

# THÈSES

PRÉSENTÉES POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

*(Mention Sciences Appliquées)*

PAR

**Roger DIDIER de SAINT-AMAND**

*Maître de Recherches Principal du cadre de l'ORSTOM*

*Ingénieur en Chef de Recherches à l'IRAT*

---

*Première Thèse :* DYNAMIQUE DES SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES  
MALGACHES EN RELATION AVEC LA RIZICULTURE

*Deuxième Thèse :* LE CONTINENTAL TERMINAL ET SON INFLUENCE SUR LA  
FORMATION DES SOLS AU NIGER.

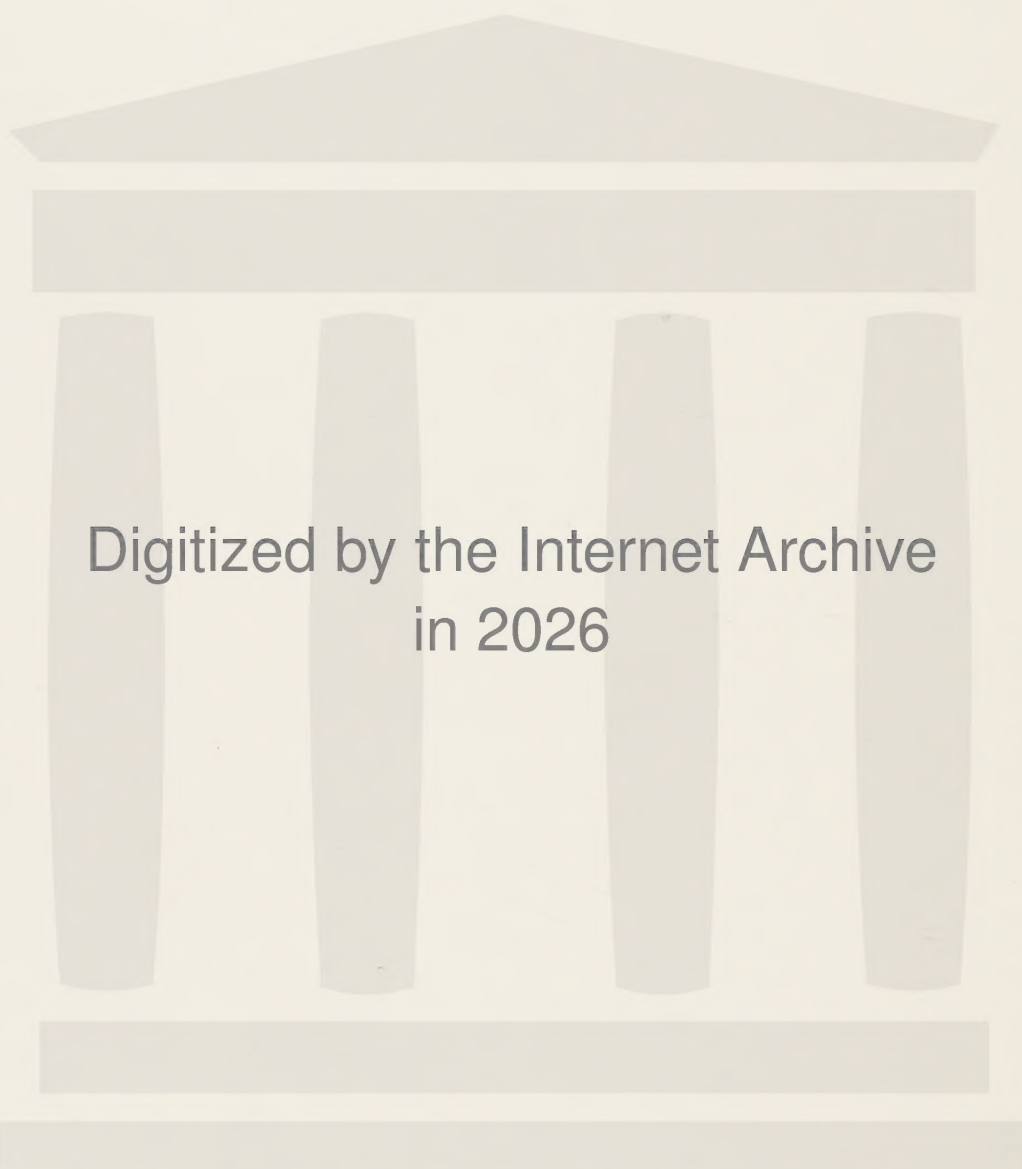
*(Proposition donnée par la Faculté.)*

---

Soutenues le 19 Décembre 1967 devant la Commission d'Examen :

**MM. : Ph. DUCHAUFOUR** *Président*

**E. MANGENOT**  
**G. AUBERT** } *Examineurs*



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41555020\\_0012](https://archive.org/details/IA41555020_0012)

## THÈSES

PRÉSENTÉES POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

*(Mention Sciences Appliquées)*

PAR

**Roger DIDIER de SAINT-AMAND**

*Maître de Recherches Principal du cadre de l'ORSTOM*

*Ingénieur en Chef de Recherches à l'IRAT*

---

*Première Thèse :* DYNAMIQUE DES SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES  
MALGACHES EN RELATION AVEC LA RIZICULTURE

*Deuxième Thèse :* LE CONTINENTAL TERMINAL ET SON INFLUENCE SUR LA  
FORMATION DES SOLS AU NIGER.

*(Proposition donnée par la Faculté.)*

---

Soutenues le 19 Décembre 1967 devant la Commission d'Examen :

**MM. : Ph. DUCHAUFOR** *Président*

**E. MANGENOT**  
**G. AUBERT** } *Examineurs*



# THESE

These are theses of the University of Leiden, written by students of the Faculty of Letters, and are to be defended in public.

These are theses of the University of Leiden, written by students of the Faculty of Letters, and are to be defended in public.

These are theses of the University of Leiden, written by students of the Faculty of Letters, and are to be defended in public.



These are theses of the University of Leiden, written by students of the Faculty of Letters, and are to be defended in public.

These are theses of the University of Leiden, written by students of the Faculty of Letters, and are to be defended in public.



## AVANT-PROPOS

*En considérant le déroulement chronologique de l'étude qui suit, c'est pour moi un agréable devoir d'exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation.*

*Ma première pensée est pour M. COURS, Inspecteur Général de Recherches à l'ORSTOM, qui, dans le cadre du service de la Recherche Agronomique à Madagascar, a su me donner au début de ma carrière d'excellentes conditions de travail dans une ambiance de sympathie.*

*J'exprime ensuite ma profonde gratitude à MM. les Professeurs DUCHAUFOUR et AUBERT qui, tout au long de mes travaux, m'ont guidé avec une amicale compréhension, sans jamais ménager leur peine. Par leur confiance et leurs encouragements constants, ils ont rendu possible la poursuite de mes recherches.*

*Ma très grande reconnaissance va également à M. le Professeur MANGENOT pour ses précieux conseils, prodigués au cours de plusieurs années, et l'honneur qu'il m'a fait d'accepter de faire partie de mon jury d'examen.*

*Je dois aussi beaucoup à trois de mes collègues de l'ORSTOM, M. le Professeur KAUFFMANN, M. le Docteur SEGALIN et M. le Directeur de Recherches RIQUIER, qui ont toujours manifesté à mon égard un esprit de franche camaraderie et m'ont fait bénéficier sans réserve de leurs connaissances.*

*En outre, j'ai contracté une grande dette vis-à-vis de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer. En effet, tout programme de recherche exigeant un financement, cet organisme a mis à ma disposition les moyens matériels nécessaires à la prospection des terrains et à la réalisation des analyses de sol.*

*Mes remerciements vont aussi à l'Institut de Recherches Agronomiques Tropicales et des Cultures Vivrières qui m'a permis de faire effectuer les travaux de dactylographie et de dessin. De plus, avec l'aide d'une subvention accordée par M. le Professeur AUBRY, Doyen de la Faculté des Sciences de Nancy, à qui je tiens également à exprimer ma reconnaissance, cet Institut a bien voulu assurer l'impression de cette Thèse et sa diffusion dans la revue L'Agronomie Tropicale.*

*Enfin, j'assure tous ceux qui m'ont apporté une aide, même des plus modestes, de toute ma gratitude.*

*Le but que je m'étais fixé en entreprenant cette étude étant de mettre au service de la production agricole les enseignements apportés par la pédologie, je la dédie aux paysans malgaches et à tous ceux qui œuvrent pour améliorer leurs conditions d'existence.*





Madagascar : Végétation de marais.

Cliché : DIDIER de SAINT-AMAND



# DYNAMIQUE DES SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES MALGACHES EN RELATION AVEC LA RIZICULTURE

## INTRODUCTION

### 1) GENERALITES

Les sols situés dans les cuvettes ou les fonds de vallées sont généralement, à Madagascar, gorgés d'eau. Ils portent, soit une végétation spontanée où dominent largement de grandes Cypéracées, soit des cultures de riz, réalisées en rizières noyées.

Ces terres, soumises à un engorgement par l'eau assez prolongé, sont dites hydromorphes. L'hydromorphie est un facteur important de la pédogenèse, puisqu'elle a conduit les pédologues français à créer, pour elle, l'une des dix classes de sols composant l'ensemble de leur classification.

L'intérêt de ces sols a tout de suite été reconnu par les premiers colons français, puisque déjà en 1898 PIOLET, dans un cours à la Sorbonne, disait : « Mis à part les terres volcaniques et les bas-fonds alluvionnés, capables d'être cultivés, les terres de la Grande Ile sont dans leur ensemble arides. »

Les sols de bas-fonds représentent la majorité des terres de culture (fig. 1 et 1 bis). Leur vocation essentielle est la production de riz qui constitue la nourriture de base du Malgache et l'un de ses principaux revenus.

Ces terres, qui représentent une valeur agricole certaine, sont, jusqu'à nos jours, cultivées de manière empirique et n'ont fait l'objet que d'études pédologiques à but cartographique qui, très généralement, donnent des descriptions et des résultats analytiques correspondant à des sols pris à un moment donné, sans se préoccuper de leur évolution dans le temps et sans faire de distinction entre les sols stables et les autres qui sont en cours de transformation rapide.

On s'est pourtant aperçu que les sols étaient changeants dans leur morphologie, dans leurs caractères physico-chimiques et dans leur aptitude à produire du riz, lorsque leurs conditions d'engorgement par l'eau se modifiaient.

Ces modifications sont courantes puisque le paysan, pour étendre sa rizière, draine le marais et fait ainsi rétrograder l'action de l'hydromorphie.

En 1951, les pédologues RIQUEL et MOUREAUX écrivaient dans une étude des sols submergés malgaches :

« Notons la très grande difficulté de prévoir, sans expérience directe, l'évolution d'un sol passant des conditions anaérobies à des conditions aérobies. Aucune étude scientifique n'a été faite à notre connaissance sur l'évolution des sols de marais en pays tropicaux. »

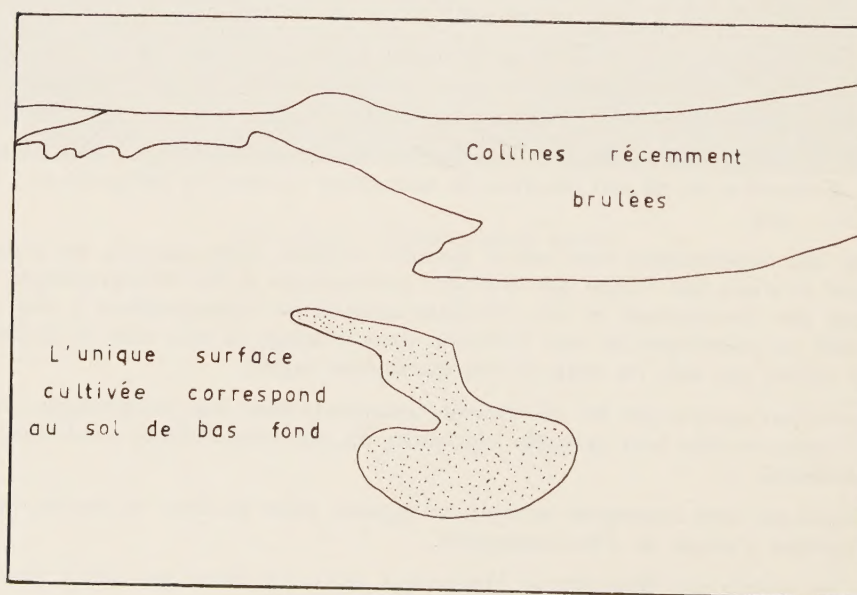
Cette remarque reste d'actualité, tout au moins en ce qui concerne Madagascar.



Fig 1 et 1 bis

INTERET AGRICOLE DES SOLS DE BAS-FONDS

(Bordure Est du Lac Alaotra)





## II) BUTS POURSUIVIS

Pour essayer de faire progresser la connaissance des sols hydromorphes, il semble nécessaire :

d'une part, de définir simplement une chaîne de sols, allant du profil le moins hydromorphe au profil le plus hydromorphe, qui soit caractéristique de la majorité des dépressions dans lesquelles l'intensité de l'engorgement par l'eau reste constante au cours de nombreuses années consécutives ;

d'autre part, d'étudier l'évolution des sols constituant cette chaîne, évolution provoquée par une modification du drainage.

Ainsi, une distinction pourrait-elle s'établir entre les sols correspondant à un engorgement stable et les sols subissant une transformation, toujours rapide, provoquée par une variation de l'intensité de l'hydromorphie.

La définition de la chaîne se réaliserait après examen d'un nombre important de dépressions, permettant de dégager les caractères essentiels et communs qui seraient mis en évidence à l'aide de quelques profils typiques, nettement différenciés les uns des autres.

L'évolution de la chaîne, consécutive à une modification brusque de drainage, s'effectuerait dans le sens de la décroissance de l'hydromorphie. En effet, à la suite de fortes poussées démographiques, l'homme s'attaque aux bas-fonds avec des moyens mécaniques de plus en plus puissants pour les drainer et développer ainsi ses aires culturales.

L'extension se réalise surtout à partir des sols les plus ennoyés, appelés « marais » ou « tourbe », car ce sont eux qui présentent les plus grandes superficies. Ce sont ces sols qui subissent les bouleversements d'ordres morphologiques et physico-chimiques les plus marqués, consécutifs au drainage.

Cette étude, se proposant de définir une chaîne de sols hydromorphes, caractéristique des dépressions, puis d'étudier l'évolution consécutive à un drainage en prenant pour exemple le sol le plus hydromorphe de la chaîne, devrait pouvoir, en améliorant la connaissance des terres de rizières malgaches, aider à orienter les méthodes de mise en valeur en vue d'une productivité agricole accrue.

La riziculture étant très développée sur les hauts-plateaux malgaches, c'est avant tout leurs sols qu'il convient de prendre en considération. Un excellent exemple est celui des marais du Lac Alaotra, partiellement mis en valeur et que l'on considère comme le grenier à riz de Madagascar.

## III) GRANDES SUBDIVISIONS ADOPTEES DANS LE TEXTE

La définition de la chaîne de sols, caractéristique des dépressions, exige des données sur l'érosion des sols de collines qui est à l'origine du matériau se déposant en bas-fond, sous forme d'alluvions, et à partir duquel se différencient les sols hydromorphes.

Il est, de plus, nécessaire de connaître la provenance du matériau organique qui contribue largement à la formation de certains horizons.

L'origine des éléments minéraux et organiques constituant le matériau originel des sols de bas-fond est précisée dans cette introduction qui se termine par un plan détaillé de l'étude entreprise.

L'étude comprend trois chapitres :

l'un relatif à la définition de la chaîne de sols ;

l'autre, à l'évolution morphologique, chimique, physique et biologique du sol le plus hydromorphe de cette chaîne soumise au drainage ;

le dernier, aux répercussions de cette évolution sur l'aptitude des terres à produire du riz.

## IV) CONSTITUTION DU MATERIAU ORIGINEL DES SOLS HYDROMORPHES

Il sera traité du mécanisme des accumulations de toutes natures dans les dépressions ; puis de l'origine des matériaux minéraux (ce qui nous conduit à définir de manière succincte : les sols érodés, les formes d'érosion, le volume des éléments transportés), enfin, de la provenance des matériaux organiques.



## 1) MECANISATION DES ACCUMULATIONS EN BAS-FONDS

Ce mécanisme est résumé par une succession de coupes de terrains, réalisées à des époques de moins en moins lointaines, sur les mêmes lieux géographiques (fig. 2).

### PREMIERE COUPE

De gauche à droite, on observe : une zone de reliefs soumis à une forte érosion, puis une zone plate et un déversoir à seuil assez élevé.

Les matériaux provenant de l'érosion des collines sont entraînés par les eaux. Leur fraction sableuse se dépose sur la zone plate à cause de la rupture de pente et leurs fractions fines passent par les déversoirs dans lesquels les courants ont des vitesses encore assez élevées.

### DEUXIEME COUPE

Si le seuil des déversoirs s'élève à la suite d'une obstruction, réalisée par des coulées volcaniques, des éboulements ou des dépôts alluviaux, l'eau s'accumule sur la zone plate. Sa présence freine le courant des cours d'eau provenant des collines, qui déposent ainsi successivement des sables, des limons, des argiles au sens granulométrique du terme. Il se constitue un biseau dont la plus grande épaisseur correspond aux dépôts sableux.

En fonction de l'intensité des courants et de l'efficacité des érosions liée à la déforestation, il se forme des successions de biseaux plus ou moins allongés, empilés les uns sur les autres qui font que, en un point géographique précis, la granulométrie d'un profil varie avec la profondeur du prélèvement.

### TROISIEME COUPE

Lorsque, en bordure de la dépression, la surface des alluvions s'approche du niveau supérieur de l'eau occupant la cuvette, de grandes Cypéracées se développent, formant un peigne végétal qui s'oppose pratiquement à tous les courants. Il en résulte que les sols qu'elles recouvrent ne reçoivent que des alluvions très fines.

Derrière ce peigne existent des vases, constituées d'argiles mélangées à des matières organiques fines, produites par décomposition des Cypéracées mortes.

### QUATRIEME ET CINQUIEME COUPES

Lorsque le niveau de l'eau dans la dépression diminue par suite d'abaissements naturels ou artificiels des seuils des déversoirs, la chaîne de sols hydromorphes se transforme en une terrasse trop sèche pour que les Cypéracées subsistent. Peu à peu, aux pieds de la terrasse s'accumulent des alluvions qui servent de base à l'installation d'une nouvelle chaîne de sols hydromorphes.

Les matériaux alluvionnés dans les dépressions sont très généralement assez abondants pour que les sols hydromorphes se constituent intégralement à partir d'eux. Il en résulte que rares sont les cas où l'hydromorphie se surajoute à des sols non remaniés. C'est la raison pour laquelle cette étude ne concerne que les sols hydromorphes d'apport.

## 2) PROVENANCE DES MATERIAUX MINERAUX

### a) LES SOLS ERODES

Les schémas précédents montrent que, dans les cas simples, seuls les sols de collines fournissent les matériaux minéraux alluvionnés en bas-fond (fig. 3 et 3 bis) et que, dans les cas complexes, ces matériaux proviennent aussi des sols de terrasses (fig. 4 et 4 bis). La participation des terrasses est réduite à cause de leur relief tabulaire qui laisse peu de prise à l'érosion.

Pour faire connaître la nature des sols érodés, nous ne pouvons donner de nombreuses descriptions de profils sous peine d'alourdir le texte, aussi choisissons-nous deux exemples représentatifs des cas les plus généraux. L'un concerne un sol de collines, l'autre un sol de terrasses.

La carte suivante (fig. 5), localisant les surfaces prospectées, montre que c'est surtout dans l'aire d'extension des « hauts-plateaux » malgaches que nous avons travaillé et que, dans cette aire, la région de l'ancien grand Lac Alaotra a été particulièrement détaillée\*.

\* Une énumération des travaux effectués est donnée en bibliographie.

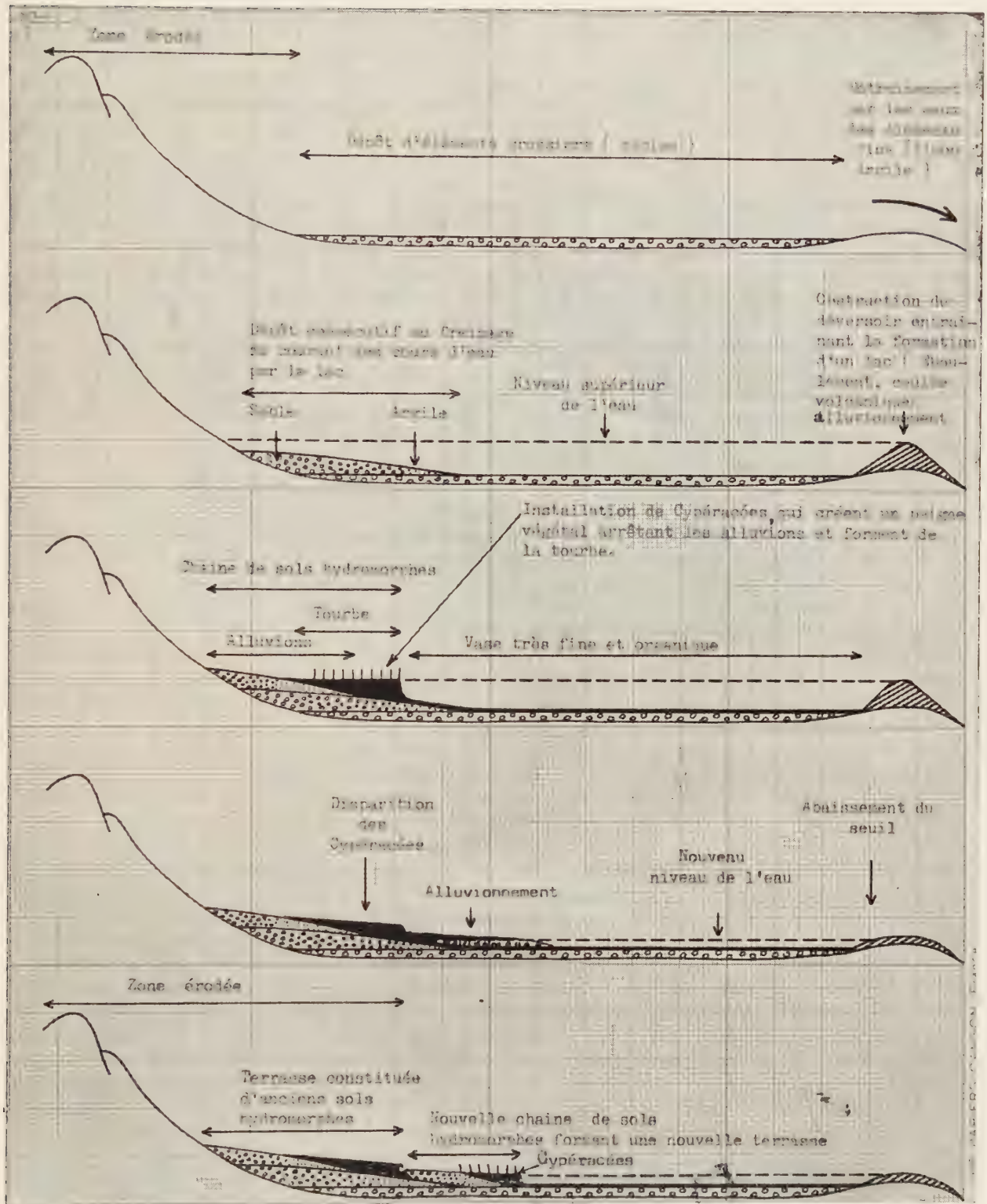


Figure 2



C'est aux environs du Lac Alaotra actuel, relique de l'ancien grand lac dont la surface s'est amenuisée par des assèchements successifs, que seront pris les exemples.

Pour éviter les confusions, il convient de noter que l'appellation « plateaux malgaches » désigne une zone d'altitude constituée de collines mollement ondulées dont les sommets sont sensiblement sur un même plan horizontal et qui forment à leurs pieds des dépressions à pentes faibles.

Dans la zone des « plateaux malgaches » on trouvera donc l'ensemble des sols figurés sur les cinq coupes de terrain précédemment considérées.

Les collines de la zone des « plateaux » sont constituées par un socle cristallin ancien qui, sous un climat mésothermique, avec une saison froide et sèche bien marquée, une saison humide fournissant plus d'un mètre de précipitations sous forme de fortes averses, a donné un sol assez homogène, de teinte rouge, ferrallitique, qui a fait appeler Madagascar l'« île rouge » et fait dire que le pays présente l'aspect et la fertilité de la brique.

L'impression d'aridité est donnée par une steppe à Graminées ayant succédé à la forêt primitive, détruite par les feux. La couleur rouge est mise en évidence par une forte érosion en nappe qui dénude les sols et par des nombreux et gigantesques ravins d'érosion formant des entailles profondes.

Ces sols rouges alimentent non seulement les dépôts rencontrés dans les nombreuses et vastes dépressions de la zone des « hauts-plateaux », mais aussi ceux réalisés par les grands fleuves, au voisinage de leur embouchure, qui constituent des plaines alluviales côtières.

#### a) PROFIL D'UN SOL FERRALLITIQUE DE COLLINES

0 à 20 cm :

Horizon brun rouge, à structure grumeleuse bien marquée, très riche en racines, assez meuble, à bonne porosité.

L'analyse granulométrique met en évidence une dominance des limons fins, puis des argiles et des sables\*.

Les teneurs en matières organiques totales sont de l'ordre de 5 %.

Les C/N sont voisins de 10.

L'humification est rapide et les taux d'humification assez élevés.

La capacité d'échange totale est de l'ordre de 15 milliéquivalents pour 100 g de terre, dont le tiers environ est saturé par les bases échangeables.

Les réserves en bases totales sont faibles.

Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est inférieur à 2.

Le pH est voisin de 5.

Le sol est peu pourvu en acide phosphorique.

20 à 30 cm :

Horizon de transition dans lequel les taux de matières organiques décroissent avec la profondeur. Il prend un ton rouge.

30 à 200 cm :

Horizon rouge, massif et plastique à l'état humide.

A l'état sec, il est grossièrement polyédrique. Les agrégats sont cohérents. Les teneurs en matières organiques totales tombent à 1,5 %. La granulométrie est analogue à celle de l'horizon de surface.

La capacité d'échange devient deux à trois fois plus faible et les taux de saturation restent sensiblement les mêmes. Les réserves en bases sont toujours faibles et le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  inférieur à 2.

Le pH est encore voisin de 5.

L'horizon ne présente pas de minéraux non altérés, sauf des quartz et parfois des micas blancs. Il jaunit souvent en profondeur et peut présenter des taches ou des concrétions qui arrivent à s'anastomoser.

\* Les principes des méthodes analytiques sont donnés dans le premier chapitre de cette étude et leur détail en annexe.

Fig. 3 et 3 bis

SOLS DE COLLINES ET SOLS HYDROMORPHES

(Marais d'Ifanja)

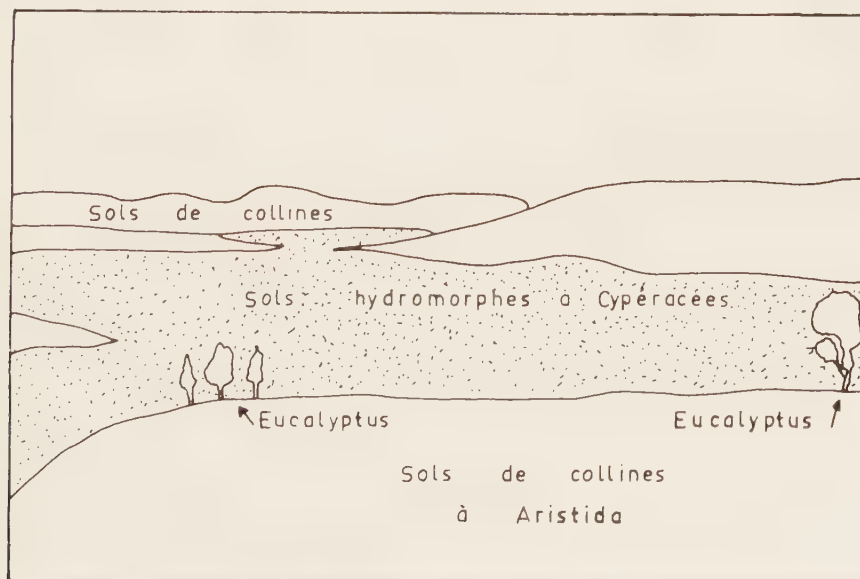
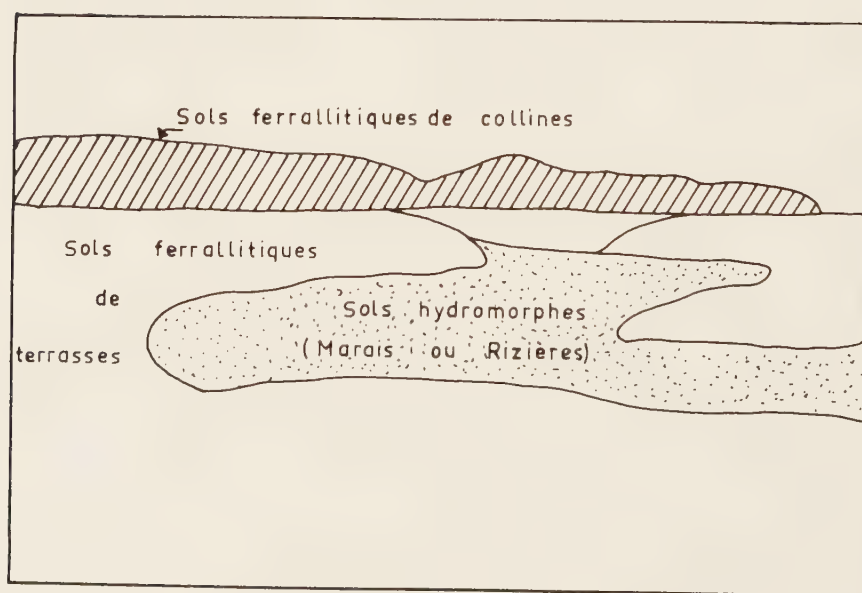




Fig. 4 et 4 bis

SOLS DE COLLINES, SOLS DE TERRASSES ET SOLS HYDROMORPHES

(Lac Alaotra)



# CARTE DE LOCALISATION DES ZONES ETUDIEES

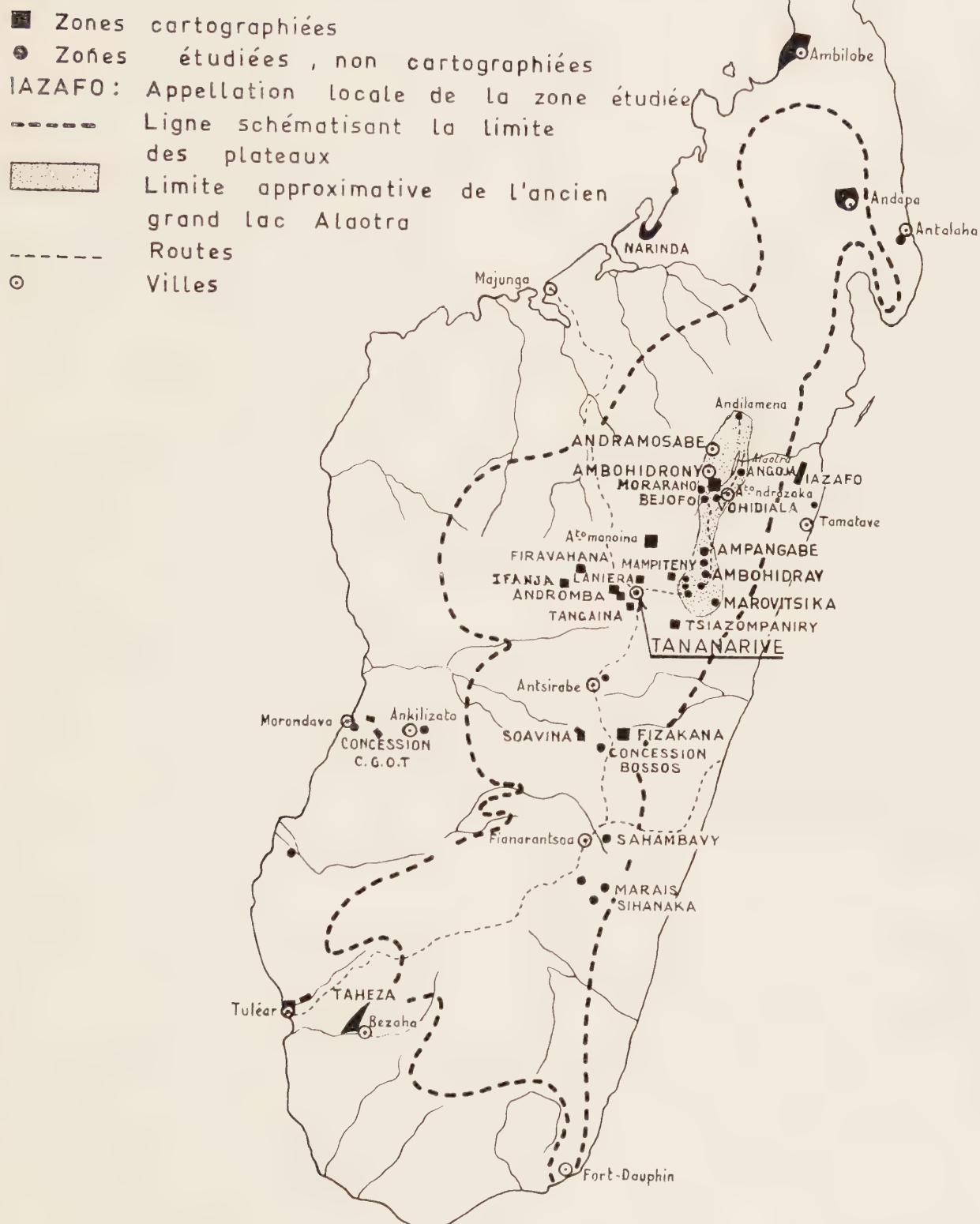


Figure 5



200 à 1.000 cm :

Horizon constituant la zone de départ du sol. Il est formé d'une roche très altérée dans laquelle les minéraux gardent leurs formes. Les feldspaths sont blanchis par formation de kaolinite et donnent à l'ensemble un ton très clair.

Cet horizon est très meuble, un peu plus riche en bases échangeables que le précédent. Bien que les minéraux libèrent des bases au cours de leur altération, il n'y a pas accumulation à cause d'un intense lessivage oblique.

Dans cet horizon inorganique, le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est égal ou supérieur à 2.

1.000 cm et plus :

Roche-mère sur laquelle se trouve une nappe à mouvement oblique.

Les principales variations autour de ce profil-type sont dues à la nature de la roche-mère et à la végétation.

Avec une roche-mère très acide, les couleurs du profil s'éclaircissent. Cela est généralement le signe d'un manque de fertilité.

Avec une roche-mère basique (amphibolites, gabbros, basaltes), le profil prend des tons plus chauds et il est plus apte à la culture.

Lorsque la forêt recouvre le sol, il existe au-dessus de l'horizon rouge un horizon jaune lié à une humidité plus grande.

#### β) PROFIL D'UN SOL DE TERRASSE

Ce sol alluvionné évolue, lorsqu'il n'est plus soumis à un engorgement par l'eau, sous des conditions pédoclimatiques, voisines de celles du profil précédent, qui entraînent la ferrallitisation.

Sa texture est hétérogène, puisqu'il est formé de dépôts successifs. Toutefois, en surface, il est assez riche en sable, par suite de l'entraînement oblique des argiles par les eaux de ruissellement.

La couverture végétale est une steppe à Graminées.

0 à 20 cm :

Horizon brun jaune possédant sensiblement autant de matière organique que l'horizon de surface d'un sol de collines. Il est grumeleux, poreux, souvent meuble.

Le rapport C/N est voisin de 10.

La capacité d'échange totale est de l'ordre de 10 milliéquivalents pour 100 g de terre, avec un degré de saturation analogue à celui des sols de collines.

Les réserves en bases sont moins élevées.

Le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  est inférieur à 2.

Le pH est de l'ordre de 5.

Chimiquement le sol est pauvre, mais il peut avoir de bonnes qualités physiques.

Il ne possède plus de mica blanc.

20 à 30 cm :

Horizon de transition possédant encore des racines nombreuses. Il est moins brun, moins grumeleux.

30 à 200 cm :

Horizon très peu organique, jaune, pouvant posséder des taches et des concrétions parfois anastomosées (vestiges de l'hydromorphie). Il est peu exploité par les racines, possède une structure massive.

Il est moins meuble et plus pauvre chimiquement que l'horizon de surface.

200 cm et plus :

Ancien sol en place ayant été recouvert par les alluvions.

Les principales variations autour de ce profil sont dues à la date d'exondation des terres :

si le drainage est récent, le sol possède encore des taux de matière organique élevés, il est gris ;

si le drainage est très ancien et que le sol n'a pas perdu trop de fer pendant le régime hydromorphe, il est rouge ;

le sol jaune représente un stade intermédiaire.

Les couleurs sont partiellement dues à l'état du fer qui est encore réduit (gris), ou partiellement hydraté (jaune), ou oxydé (rouge).

Les sols de collines ou de terrasses, soumis à l'érosion sont, pour l'ensemble de leurs profils, pauvres chimiquement. Toutefois, il convient de souligner que l'horizon organique, peu épais, est légèrement plus fertile que les sous-jacents et que la zone de départ du sol de colline présente des réserves en bases plus élevées que le restant du profil.

#### b) LES FORMES D'ÉROSION

L'érosion agit suivant deux processus :

en nappe,

en ravins (c'est la « Gully érosion » des Américains ; le ravin est appelé « Lavaka » à Madagascar).

##### α) ÉROSION EN NAPPE

L'érosion en nappe (fig. 6 et 6 bis) a une action de surface qui a pour conséquence de décaper le profil. L'horizon organique se régénère, tant qu'une végétation graminéenne dense subsiste. Il disparaît lorsque l'érosion est intense, ce qui se réalise sur sol mal couvert, en pente, possédant des agrégats instables.

L'horizon rouge sous-jacent est, dans ces conditions, parfois attaqué.

##### β) ÉROSION EN RAVINS

L'érosion en nappe lui ouvre la voie. L'érosion en ravins (fig. 7 et 7 bis) progresse difficilement en profondeur dans l'horizon rouge, mais avec une extrême rapidité dans la zone de départ. L'horizon rouge est alors affouillé et s'écroule par pans.

Sur des roches très altérables, tels que certains gneiss, les ravins atteignent 20 à 30 cm de profondeur et sont si nombreux qu'ils se rejoignent l'un l'autre. Cette forme d'érosion est moins courante et moins développée dans les sols de terrasses.

Les matériaux arrachés aux sols en place sont constitués : par l'horizon rouge, pauvre, peu épais comparé à la zone de départ, et par la zone de départ.

Ces matériaux, homogénéisés au cours des transports par les rivières, constituent des dépôts assez riches en bases, qui ont une topographie relativement plane (fig. 8 et 8 bis). Ils sont faciles à irriguer, puisque situés en bas de pente et drainables à volonté par déroctage des déversoirs.

Ces dépôts constituent donc de bonnes terres agricoles.

#### c) L'IMPORTANCE DES DÉPÔTS

La sortie d'un ravin d'érosion correspond à un véritable cône de déjection. A proximité du ravin nous trouvons les graviers et les sables et, bien plus loin, les limons et les argiles.

Sur deux rivières débouchant dans la dépression du Lac Alaotra, nous avons obtenu :

|                    | Hauteur<br>de la lame<br>d'eau<br>(cm) | Débit<br>(m <sup>3</sup> /s)                   | Charge<br>(g/litre) | Granulométrie des éléments transportés<br>(%) |       |              |                   | Observations                                                                 |
|--------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------|-------|--------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------|
|                    |                                        |                                                |                     | Argile                                        | Limon | Sable<br>fin | Sable<br>grossier |                                                                              |
| Rivière Menaloha . | 30                                     | 4                                              | 5                   | 37                                            | 36    | 27           | 0                 | Crue<br>Forte crue<br>Très forte crue                                        |
|                    | 50                                     | 15                                             | 26                  | 28                                            | 36    | 36           | 0                 |                                                                              |
|                    | 50                                     | 20                                             | 89                  | 24                                            | 31    | 45           | 0                 |                                                                              |
| Rivière Lohafasika | 30                                     | 9<br>(Après<br>passage<br>de l'onde<br>de crue | 2                   | 26                                            | 28    | 46           | 0                 | Le bassin versant<br>est plus riche en<br>sable que celui<br>de la Menaloha. |

Ces résultats montrent que, même à plusieurs dizaines de kilomètres des ravins d'érosion, les débits solides sont considérables. Les fortes pluviométries et la grande étendue des bassins versants entraînent un alluvionnement intense.



Fig. 6 et 6 bis

EROSION EN NAPPE

(Région de Tananarive)

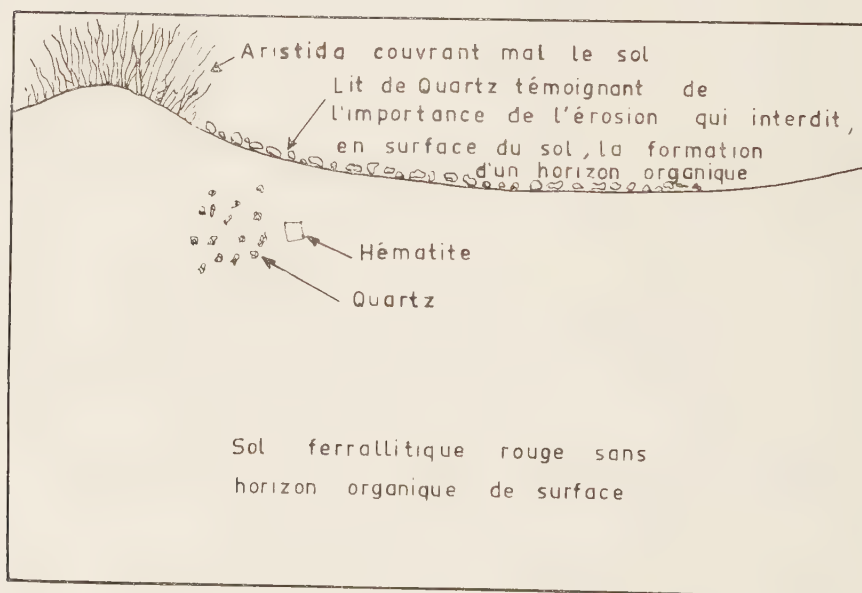


Fig. 7 et 7 bis

EROSION EN RAVINS

(Ambatomanoïna)

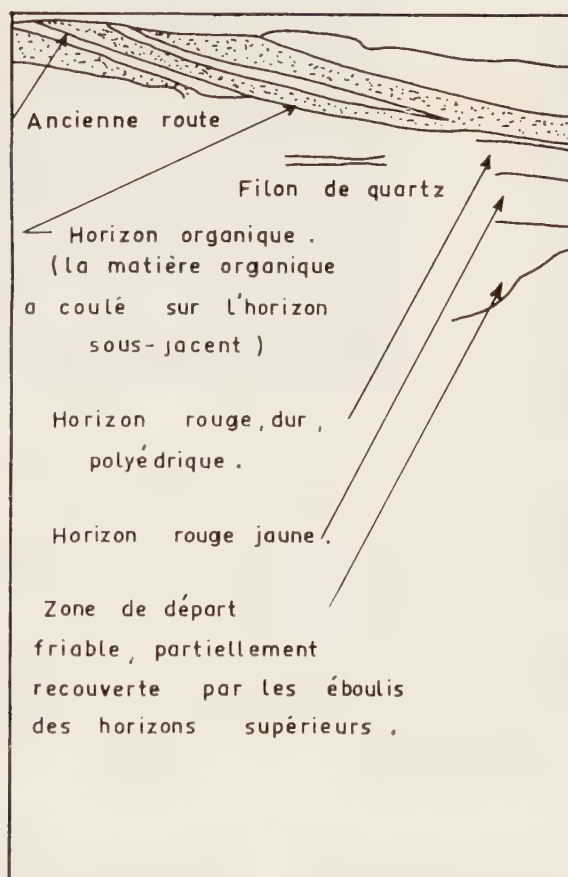
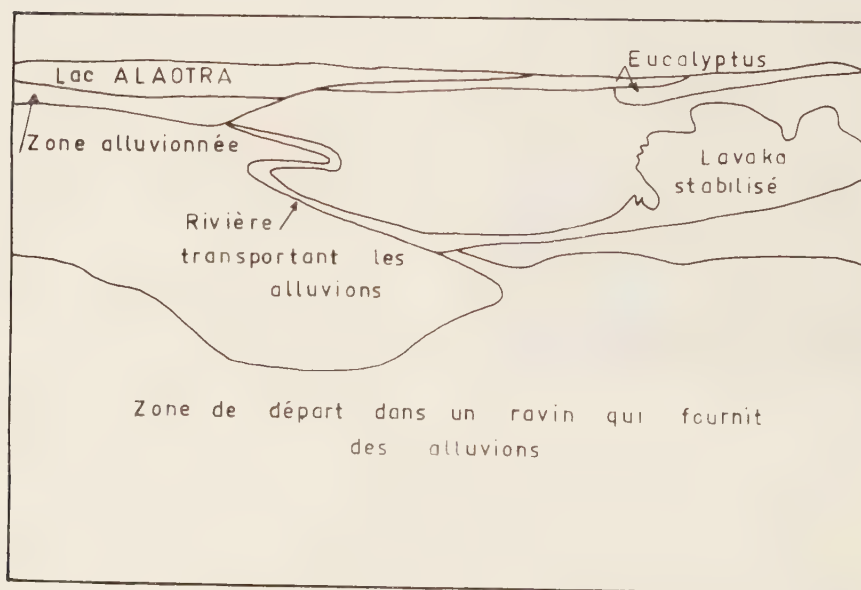




Fig. 8 et 8 bis

EROSION ET ALLUVIONNEMENT

(Bordure Est du Lac Alaotra)



## VEGETATION NATURELLE

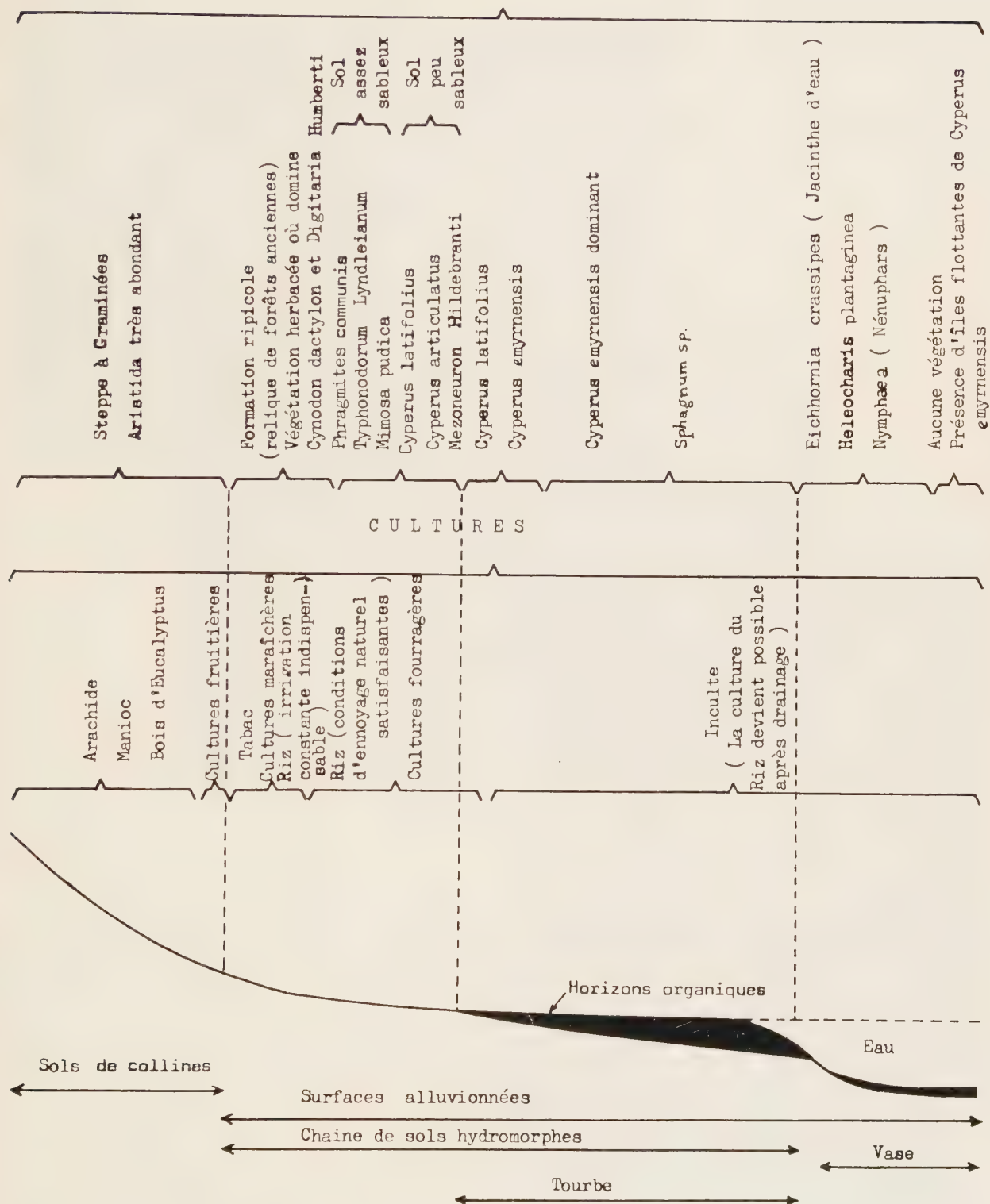


Figure 9



### 3) ORIGINE DES MATERIAUX ORGANIQUES

Les éléments organiques contribuent de plus en plus à fournir le matériau constituant les sols, à mesure que l'intensité de l'hydromorphie croît.

Il est possible, pour la région des « hauts-plateaux », de résumer l'origine des matières organiques par le schéma précédent (fig. 9), représentant une coupe intéressant : les sols de collines, la chaîne de sols hydromorphes et la zone en eau de la dépression. Pour les divers sols pris en considération, le schéma mentionne la végétation naturelle la plus caractéristique (fig. 10, 11, 12, 13 et 13 bis), puis les principales cultures effectuées. Par esprit de simplification, ne sont pas mentionnés les sols de terrasses qui ont une végétation voisine de celle des sols de collines.

Fig. 10

VEGETATION DES SOLS A HYDROMORPHIE POUSSEE



*Cyperus latifolius* en fleur.

L'examen de ce schéma montre que là où les sols ont des horizons très riches en matières organiques, sur une forte épaisseur, la végétation est constituée de Cypéracées avec une dominance, ou l'exclusivité, de *Cyperus emyrensis*\* appelé localement « Zozoro ».

Les matières organiques des marais malgaches dérivent donc avant tout de *Cyperus emyrensis* et, accessoirement, de *Cyperus latifolius* appelée « Herana ».

Ainsi, sur des matériaux arrachés par l'érosion aux sols ferrallitiques et déposés dans les dépressions, s'installe une végétation qui, par ses débris, contribue à donner aux sols hydromorphes leurs caractéristiques morphologiques et physico-chimiques.

\* Selon les Auteurs, le nom botanique du « Zozoro » peut être aussi *Cyperus madagascariensis* ou *Cyperus imerinensis*.

Fig. 11 et 12

VEGETATION DES SOLS A HYDROMORPHIE TRES PUSSEE



Fig. 11. - *Nymphaea*.

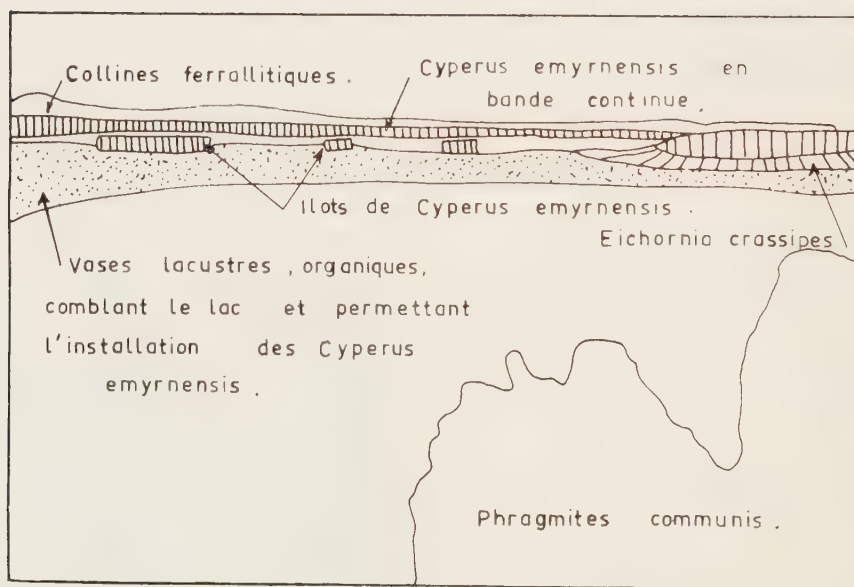


Fig. 12. - *Cyperus emyrensis*.

Fig. 13 et 13 bis

VEGETATION EN BORDURE DE LA ZONE EN EAU

(Lac Alaotra)





## V) PLAN D'ENSEMBLE ADOPTE

Cette introduction a permis de souligner l'intérêt cultural que présentent les sols hydromorphes, de faire le point sur le caractère des études dont ils ont fait l'objet, de fixer les grandes lignes du travail qui va être entrepris et de définir la nature du matériau originel.

Elle se terminera en donnant le plan du texte qui va suivre, composé de trois chapitres et d'une conclusion générale.

La présentation du plan permettra d'évoquer les idées qui nous ont guidé, de dégager les liaisons qui existent entre les divers chapitres et de laisser entrevoir les principaux résultats obtenus.

### CHAPITRE I. DEFINITION D'UNE CHAÎNE DE SOLS, TYPIQUE DES DEPRESSIONS DANS LESQUELLES L'ENGORGEMENT PAR L'EAU EST STABLE DEPUIS DE NOMBREUSES ANNEES.

Ce chapitre est subdivisé en trois parties :

la première se rapporte à l'**étude morphologique des principaux profils constituant la chaîne des sols** ;

la seconde est relative à la **connaissance des caractères physiques, chimiques et minéralogiques** de ces mêmes profils :

elle débute par une **définition sommaire des techniques analytiques**, indispensable à l'appréciation des valeurs données (le détail des méthodes est mis en annexe) ;

elle fournit ensuite les **résultats analytiques** concernant :

- la granulométrie,
- les caractères essentiels des éléments organiques (taux de matière organique totale, d'azote total, valeur du C/N, importance de la fraction humique),
- le complexe absorbant,
- le pH et le pouvoir tampon,
- la minéralogie de la fraction argileuse,
- l'état du fer,
- la valeur du rapport silice sur alumine.

Ces résultats sont présentés de manière à faciliter les comparaisons entre les divers profils et au sein d'un même profil.

une **conclusion** est donnée, résumant les principales constatations faites, puis les différents sols étudiés sont placés dans les **classifications pédologiques** à portée internationale.

### CHAPITRE II. CONSEQUENCES D'ORDRE PEDOLOGIQUE RELATIVES AU DRAINAGE DES DEPRESSIONS, EN PRENANT POUR EXEMPLE LE SOL LE PLUS HYDROMORPHE DE LA CHAÎNE.

Le sol le plus hydromorphe de la chaîne est choisi pour illustrer cette évolution, car c'est pour lui que les conséquences du drainage sont les plus marquées et c'est lui qui couvre, dans les dépressions, les superficies les plus larges.

La variation du degré d'hydromorphie du profil a été prise dans le sens de la diminution pour connaître les conséquences de l'action de l'homme, désireux d'étendre ses zones de cultures, par drainage des marais.

On peut dire qu'à Madagascar il n'y a pas d'évolution par drainage du marais sans intervention du feu.

En effet, les méthodes traditionnelles de culture du riz conseillent, sur les rizières entourant le marais, de brûler, après la récolte, les pailles et les mauvaises herbes pour faciliter les labours. Ces incendies gagnent le marais et prennent de l'ampleur lorsque le drainage est en cours d'amélioration et que le volume de la végétation de Cypéracées ainsi que celui des débris organiques accumulés à la surface du sol sont importants.

Les feux s'amortissent à mesure que le combustible disparaît, ce qui revient à dire qu'ils sont intenses dans les premiers temps qui suivent l'amélioration du drainage et qu'ils ont ensuite une action superficielle.

On mettra tout d'abord en évidence les résultats de l'évolution des terres, consécutive à l'action combinée du drainage et du feu, liée aux méthodes culturales adoptées depuis des siècles, en laissant de côté les sols trop récemment brûlés.

On dégagera ensuite les effets particuliers des incendies récents dont certaines conséquences sont éphémères. C'est ainsi par exemple que les cendres produites, enrichissant chimiquement le sol, sont éliminées par érosion dans l'année qui suit leur formation.

Ce premier chapitre se composera donc de **deux sous-chapitres** :

l'un traitant de l'**évolution à longue échéance**, par action combinée du drainage et du feu ;  
l'autre de l'**évolution à brève échéance**, par action immédiate d'un brûlage.

Une conclusion d'ensemble sur l'évolution à longue et à courte échéance sera donnée.

#### a) EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE PAR ACTION COMBINEE DU DRAINAGE ET DU FEU

Pour traduire cette évolution, on se référera à un profil :

- 1) pris dans son état initial (avant tout drainage) ;
- 2) ayant atteint un stade évolutif moyen ;
- 3) se trouvant à un stade évolutif poussé.

La limitation du nombre de stades évolutifs pris en considération est indispensable pour ne pas donner trop d'ampleur au texte et pour ne mettre en évidence que des effets massifs, valables pour toutes les dépressions. L'essentiel est de faire saisir le sens de l'évolution qui est toutefois contrôlé par l'étude de multiples stades intermédiaires.

Ce sous chapitre comprend **trois paragraphes** :

le premier concerne l'**étude morphologique des divers stades évolutifs d'un même profil** ;

le second correspond à la **connaissance des caractères physiques, chimiques, minéralogiques et biologiques** de ces stades :

il débute par la **définition sommaire des techniques analytiques**, non décrites dans le chapitre I (le détail des méthodes est donné en annexe) ;

il fournit ensuite des **résultats analytiques** analogues à ceux énumérés dans le chapitre I et des résultats plus spéciaux concernant : les matières organiques, les tests biologiques et les aptitudes des sols à alimenter en eau les végétaux ;

une **conclusion** résume les principaux résultats. Elle montre que le stade évolutif moyen réunit des conditions apparemment favorables à de bonnes aptitudes culturales.

#### b) EVOLUTION A BREVE ECHEANCE PAR ACTION IMMEDIATE D'UN BRULAGE

Ce sous-chapitre comprend **quatre paragraphes** :

dans un premier paragraphe, c'est l'**intensité des incendies**, qui dépend de la nature du matériel organique brûlé (végétal déshydraté et débris anciens) et de l'efficacité du drainage, qui est étudiée ;

dans un autre paragraphe, ce sont les **conséquences du feu sur la morphologie des profils** qui sont envisagées ;

un troisième paragraphe est destiné à faire connaître le **rôle du feu sur les caractères physiques, chimiques et biologiques des profils** ;

un dernier paragraphe est consacré aux **répercussions des brûlages sur les érosions**.

Les actions du feu sont mises en évidence, soit par des observations et des mesures faites sur des incendies se propageant librement dans le marais, soit par des brûlages effectués en laboratoire qui sont d'une pratique facile. (Il convient de souligner que les brûlages en laboratoire sont plus poussés que ceux que l'on observe sur le terrain. En effet, les matières organiques peuvent être parfaitement déshydratées et, de plus, les combustions sont réalisées à l'aide de becs de gaz alors que, sur le terrain, ce sont les matières organiques elles-mêmes qui fournissent les flammes).

Une conclusion résume l'ensemble des faits observés et souligne le caractère éphémère de certaines actions.

### c) CONCLUSION D'ENSEMBLE SUR L'ÉVOLUTION A LONGUE ET A BREVE ÉCHEANCE

Elle fait remarquer que deux profils réunissent des conditions apparemment favorables à de bonnes aptitudes culturales :

- celui correspondant au sol ayant atteint, à longue échéance, un degré moyen d'évolution ;
- celui possédant en surface les produits formés par l'incendie récent d'un sol très organique, déshydraté.

Ces constatations d'ordre agronomique amorcent le chapitre suivant, qui est abordé après avoir placé les profils des divers stades évolutifs **dans les classifications pédologiques** et les avoir comparés à ceux constituant la chaîne des sols hydromorphes, précédemment étudiés.

### CHAPITRE III. INFLUENCE DE L'ÉVOLUTION, PROVOQUÉE PAR DRAINAGE, DU SOL LE PLUS HYDROMORPHE DE LA CHAÎNE SUR SON APTITUDE A NOURRIR LES VÉGÉTAUX.

Le matériel végétal choisi pour tester la valeur agronomique des terres est le riz. En effet, les marais drainés servent toujours en culture traditionnelle à la riziculture. De plus, les divers essais de comportement, conduits par les services agricoles, concluent à leur vocation rizicole.

Les tests relatifs à la détermination de la valeur agronomique du profil le plus hydromorphe de la chaîne au cours de son évolution par drainage concernent non seulement les horizons superficiels, mais aussi les horizons sous-jacents, couramment mis en surface au cours des travaux de nivellement qui suivent le drainage. Ces travaux sont indispensables à l'aménagement des rizières puisque celles-ci, portant une lame d'eau, doivent être horizontales.

La valeur agronomique des cendres, obtenues par combustion des horizons organiques du profil en début d'évolution, est aussi évaluée.

Bien que le pouvoir d'une terre à fournir de bonnes récoltes soit à considérer sous deux aspects, l'un correspondant aux aptitudes naturelles à la fertilité, l'autre aux aptitudes artificielles obtenues par des apports d'engrais, nous pensons que, dans le cas des sols de marais, très organiques, en cours d'évolution, le premier aspect présente un intérêt particulier. Ce chapitre lui sera donc consacré.

Dans un sol de marais drainé, la minéralisation progressive des matières organiques, accumulées pendant la phase d'engorgement, met à la portée des plantes les éléments nécessaires à leur nutrition. De plus, ces terres, placées en bas de pente, reçoivent des eaux d'irrigation, chargées en alluvions fines et en produits solubilisés qui compensent parfois les exportations dues aux récoltes et permettent ainsi aux rendements de garder assez longtemps une certaine stabilité.

Enfin, la riziculture sans engrais est d'une pratique courante à Madagascar.

Ce chapitre se compose de **deux paragraphes** et d'une **conclusion** :

le premier paragraphe concerne l'**alimentation en eau du végétal**.

Bien que la riziculture noyée soit de règle, les sols récemment drainés, placés aux extrémités des canaux d'irrigation, sont parfois si mal alimentés en eau que les cultures doivent se contenter des réserves en eau du sol. Si celles-ci sont faibles, le végétal flétrit et meurt, entre deux irrigations trop espacées.

La notion de réserve en eau du sol devient encore plus intéressante lorsque des cultures fourragères alternent avec celles du riz. En une année, un même champ peut en effet produire une récolte de fourrage et une de riz.

le paragraphe suivant traite du **comportement du riz sur divers horizons du profil plus ou moins évolués, placés dans de bonnes conditions d'alimentation en eau** ;

la **conclusion**, fondée sur les résultats donnés par une expérimentation en vases de végétation et en cases lysimétriques, souligne que les sols qui présentent à l'analyse les meilleurs caractères physiques, chimiques et biologiques sont aussi les plus productifs. Des conseils pratiques, destinés à accroître les rendements et à les maintenir élevés au cours des temps, sont donnés.

### 4) CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Elles reprennent les principales observations réalisées et constatations faites au cours des diverses parties de cette étude.

Elles soulignent ensuite l'intérêt que présente la connaissance des sols hydromorphes, non seulement sur le plan scientifique, mais aussi pour la mise en valeur agricole des terres, établie dans le but d'une productivité optimale.

### 5) BIBLIOGRAPHIE

### 6) ANNEXE

Méthodes analytiques.



## CHAPITRE I

# DEFINITION D'UNE CHAÎNE DE SOLS, TYPIQUE DES DEPRESSIONS DANS LESQUELLES L'ENGORGEMENT PAR L'EAU EST STABLE DEPUIS DE NOMBREUSES ANNEES

La carte donnée plus haut\*, à propos de l'origine des matériaux minéraux constituant les sols hydromorphes, montre que c'est avant tout la zone des plateaux qui a été étudiée et, dans cette zone, tout particulièrement, la région du Lac Alaotra.

Chacune des dépressions prospectée a fait l'objet d'un rapport rédigé à la fois pour définir la morphologie des profils et leurs caractères physiques et chimiques, mais aussi pour conclure sur leurs aptitudes à porter du riz dans leur état naturel d'engorgement au moment de l'étude, puis après drainage. Ces rapports, dont la liste est mentionnée en bibliographie, ont fourni des éléments pour la rédaction de ce chapitre et du suivant.

Après l'examen de nombreuses chaînes hydromorphes, les caractères essentiels qu'elles ont en commun ont pu être dégagés. Pour exposer ces caractères sans alourdir le texte, un unique exemple, correspondant à un cas moyen, pris dans la région du Lac Alaotra, a été choisi.

A des détails près, l'exposé relatif à cet exemple est valable pour les autres dépressions malgaches, à la condition d'admettre que le niveau des valeurs d'un élément, tel que le calcium échangeable, est lié à la nature du bassin versant fournissant les alluvions et qu'il peut donc être plus élevé dans l'ensemble d'une dépression que dans l'ensemble d'une autre. Quels que soient ces niveaux, le sens de la variation de l'élément, au cours d'une hydromorphie croissante ou régressive, est la même d'une dépression à l'autre.

L'objectif essentiel de cette étude est précisément la définition du sens de cette variation. Souvent, les divers niveaux s'éloignent peu les uns des autres.

Les expériences relatives à la valeur agricole des sols soumis à un drainage, exposées dans le chapitre III, sont réalisées sur des terres de la région du Lac Alaotra et constituent ainsi la suite logique de l'exemple pris dans les chapitres I et II.

Ce chapitre I est ainsi composé :

Paragraphe I : Morphologie des principaux profils constituant cette chaîne.

Paragraphe II : Caractères analytiques des divers profils de la chaîne.

Sous-paragraphe A : Définition sommaire des techniques analytiques.

Sous-paragraphe B : Résultats analytiques obtenus.

Paragraphe III : Conclusions relatives au premier chapitre et classification pédologique des sols étudiés.

## I) MORPHOLOGIE DES PRINCIPAUX PROFILS CONSTITUANT CETTE CHAÎNE

Pour situer la position topographique de la chaîne de sols que nous allons étudier, il convient de se référer à la troisième coupe de terrain fournie dans l'introduction illustrant le mécanisme des accumulations en bas-fonds\*\*.

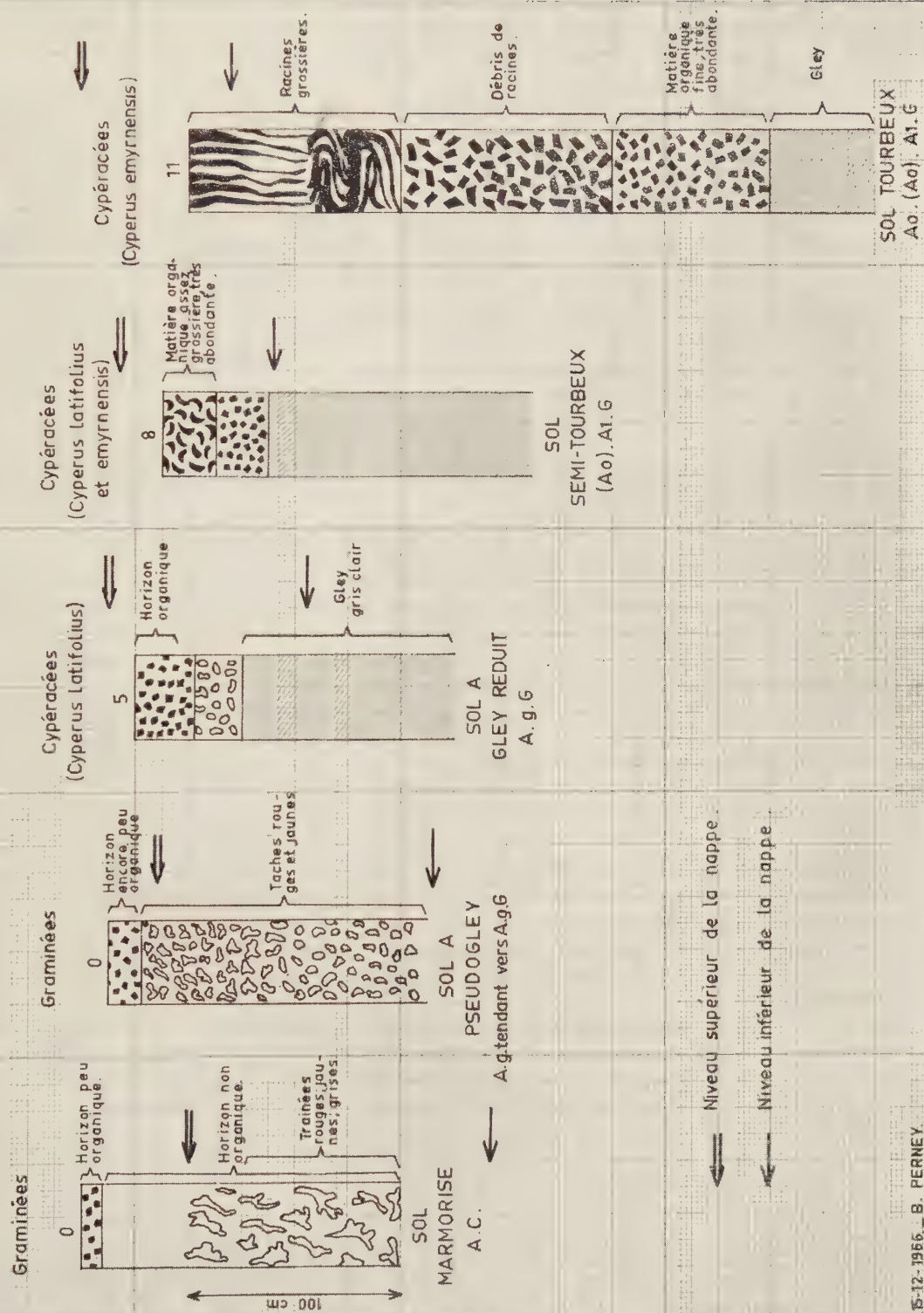
Les sols hydromorphes commencent à se former au pied des zones érodées et s'étendent jusqu'aux eaux libres emplissant le centre des dépressions. Plus le voisinage des eaux libres est immédiat, plus l'hydromorphie est grande.

Pour faciliter la description morphologique de la chaîne, nous traçons un schéma (fig. 14) relatif aux cinq principaux profils de sols la constituant, disposés dans le même sens que sur la troisième coupe de terrain donnée en introduction.

\* Voir figure 5.

\*\* Voir figure 2.

# CHAINE DE SOLS PRESENTANT DES CARACTERES D'HYDROMORPHIE



15-12-1956 B. PERNEY

Figure 14

Ce schéma respecte la position topographique relative d'un profil par rapport à ses voisins et indique successivement :

le type de végétation spontanée ;

la durée en mois de l'engorgement de la surface du sol, au cours d'une année (durée exprimée par un chiffre placé au-dessus du croquis de chaque profil) ;

les niveaux extrêmes de battement du toit de la nappe au cours de l'année (symbolisés par des flèches) ;

les principales empreintes morphologiques laissées dans les profils par l'hydromorphie, qui sont à mesure que son intensité croît :

pour les horizons profonds :

des taches diffuses (sol marmorisé),

des taches à contours nets et de couleurs très tranchées (pseudogley),

la présence d'une couche massive, peu perméable, d'un gris uni très clair (gley réduit) ;

pour les horizons supérieurs :

l'accumulation progressive de matières organiques devenant de plus en plus grossières ;

le nom de chacun des profils, choisi d'après le caractère morphologique qui le définit le mieux (exemple : « sol à pseudogley ») [nous n'aborderons la classification pédologique qu'après les études morphologiques et analytiques, mais ces noms permettront de faire facilement référence à l'un ou à l'autre des profils] ;

une succession de lettres qui correspond à la désignation des horizons de chaque profil, suivant la nomenclature internationale (exemple : A. g. Go.).

Nous allons étudier successivement les profils figurés sur le schéma, en sachant que le passage latéral de l'un à l'autre se fait progressivement et qu'il existe ainsi tous les intermédiaires possibles.

## 1) SOL MARMORISE

Ce profil est le moins hydromorphe de la chaîne, mais il constitue déjà son premier maillon.

La végétation composée de graminées herbacées, où dominant les *Cynodon* et *Digitaria*, n'est pas assez haute et touffue pour freiner les eaux amenées par les rivières pendant les forts orages qui inondent la surface du sol.

Ces eaux boueuses ont des vitesses de déplacement variables et provoquent des dépôts assez hétérogènes. Toutefois, la fraction limoneuse y est généralement bien représentée.

Elles ne stagnent pas sur le sol, s'écoulent vers les terres situées topographiquement plus bas ou s'infiltrant partiellement en profondeur.

Le profil marmorisé présente l'aspect suivant :

0 à 10 cm :

Horizon légèrement organique de couleur brun gris (n° H 32 du code expolaire de CAILLEUX et TAYLOR) à structure grumeleuse, riche en racines, meuble, assez poreux, à tendance plastique à l'état humide\*.

10 à 60 cm :

Horizon rouge-jaune (n° F 36 du code expolaire), peu organique, à structure fondue, moins meuble et moins poreux\*\*.

60 cm et plus :

Horizon analogue au précédent, au point de vue structure et consistance, possédant sur un fond rouge-jaune des traînées à contours diffus de teinte : rouge vif, jaune, grise.

\* Au code MUNSELL, cet horizon est : 2,5 YR 4/8.

\*\* Au code MUNSELL, cet horizon est : 2,5 YR 3/6.



Cet horizon bariolé, qui caractérise le profil, est lié à la présence d'une nappe phréatique temporaire alimentée partiellement par les eaux d'inondation s'infiltrant verticalement dans le sol, mais surtout obliquement par les eaux de pluies qui ont pénétré dans les terres des collines voisines et descendent ensuite dans la zone de départ de ces sols, le long du sommet des roches-mères cristallines non altérées, jusqu'aux zones hydromorphes.

Sur le schéma, la flèche indiquant le niveau inférieur du toit de la nappe est placée en dessous du profil pour signifier que le sol est parfaitement ressuyé pendant une longue période de l'année. Le niveau supérieur du toit est situé vers le sommet de l'horizon marmorisé. Soulignons qu'il importe de faire une distinction nette entre cette nappe profonde et les ennoyages rapides que subit le sol, en surface, au cours des orages.

Ce profil ne porte la marque d'une hydromorphie temporaire que dans ses horizons profonds. En surface, il est soumis à des conditions analogues à celles qui existent dans les sols de collines voisins, qui entraînent la ferrallitisation.

Le sol est du type A.C. (A représente l'horizon de surface différencié par un enrichissement en matière organique améliorant la structure et C le matériel parental qui n'est autre qu'un empilement d'alluvions fluviales à texture variable).

Ce profil, appelé par les indigènes « baïbo » et dans certains rapports pédologiques « alluvions fluviales récentes », est riche, lorsque les dépôts sont récents, en minéraux en cours d'altération : micas, feldspaths, amphiboles, pyroxènes.

La marmorisation est plus intense lorsque les granulométries s'affinent. Il y a donc des couches plus ou moins bariolées.

La nappe profonde permet des cultures de décrue. Les racines pénètrent de plus en plus profondément, à mesure que la plante se développe et que la nappe s'abaisse au cours de la saison sèche.

Dans ce sol il n'y a pas d'horizon B d'accumulation, pas plus d'ailleurs que dans ceux que nous allons étudier par la suite.

## 2) SOL A PSEUDOGLEY

Il porte la même végétation que le précédent et ne se différencie en surface que par un horizon organique un peu plus épais et mieux individualisé.

0 à 15 cm :

Horizon organique brun gris (H 32), à structure grumeleuse ou nuciforme, riche en racines, meuble.

15 à 65 cm :

Horizon moins coloré par la matière organique, riche en traînées diffuses rouges et jaunes, parfois grises, donnant un ensemble rouge-jaune (F 36).

Il est assez meuble et présente une structure fondue à l'état humide, devenant polyédrique à l'état sec.

Le passage à l'horizon suivant est très progressif.

65 cm et plus :

Horizon voisin du précédent, mais présentant des taches à contour net. Cet horizon devient tacheté alors que l'autre est marmorisé.

Vers la base de cet horizon, les tons gris se mettent à dominer par élargissement des taches grises. On peut donc subdiviser cet horizon en deux :

horizon à dominance de jaune et rouge, ayant une cinquantaine de centimètres d'épaisseur ;

horizon à dominance de gris, traduisant une hydromorphie plus poussée.

L'ensemble de ces horizons tachetés présente une structure fondue à l'état humide et grossièrement polyédrique à l'état sec.

Ainsi, dans ce profil, les traînées gagnent la surface du sol, mais sont peu visibles dans l'horizon supérieur assez bien coloré par les matières organiques. D'autre part, un véritable pseudogley naît en profondeur qui peut, lorsque le sol est drainé, fournir des concrétions dures, riches en fer.

Les niveaux de battement de nappe restent éloignés l'un de l'autre, comme pour le profil précédent, mais la nappe est ici plus élevée et se maintient, dans le sol, plus longtemps au cours d'une année. La phase drainante, pendant laquelle le sol est aéré, reste dominante.

Le profil est du type A. g. (g désigne le pseudogley).

Lorsque l'hydromorphie s'accroît, nous avons A. Go. et même parfois A. Go. (Go désigne un horizon de gley oxydé, possédant peu de taches de couleurs vives) \*.

La distinction à l'œil des couches en fonction de leur granulométrie se fait moins facilement que dans le profil précédent, l'homogénéité étant plus grande. Le sol a tendance à être plus compact, surtout dans les horizons de pseudogley.

### 3) SOL A GLEY RÉDUIT

La végétation, à base de Cypéracées, tranche nettement avec celle des sols précédents. En surface, la terre prend un ton gris foncé. L'hydromorphie influence l'ensemble du profil mais conserve une action plus forte en profondeur, se traduisant par un gley réduit bien développé.

0 à 25 cm :

Horizon bien coloré par les matières organiques qui sont un peu plus abondantes que dans le profil précédent. Le ton gris foncé (J 90 au code expolaire) à l'état humide s'éclaircit en séchant \*\*. Il existe des taches brun-rouge.

A l'état humide, le sol, collant et plastique, présente une structure massive.

A l'état sec, le sol, dur, présente une structure polyédrique parfois nuciforme. La cohésion des agrégats est alors forte.

25 à 50 cm :

Horizon moins coloré par la matière organique, dans lequel les taches à contour net sont plus visibles que dans l'horizon supérieur. Les racines restent nombreuses. La structure est massive à l'état humide, grossièrement polyédrique à l'état sec.

50 cm et plus :

Horizon de gley caractérisé à l'état humide par une couleur gris clair presque uniforme (B 90 au code expolaire) ou gris-bleu clair \*\*\*. Il a généralement une texture fine qui lui confère une forte plasticité, mais peut parfois présenter une fraction sableuse assez importante. Dans ce cas, le sable est colmaté par des éléments plus fins et l'horizon reste quand même compact.

La structure est massive. Lorsque le toit de la nappe en saison sèche descend dans le profil, cet horizon reste gorgé d'eau sauf au cours des années particulièrement peu pluvieuses. L'horizon, à l'état sec, est dur, grossièrement polyédrique et présente des fentes de retrait moins larges que dans les vertisols.

L'hydromorphie devient donc quasi permanente dans l'horizon de gley et le battement du toit de la nappe acquiert une amplitude plus faible que dans les profils précédents.

En surface, l'engorgement ne dépasse pas cinq mois par an et coïncide avec la saison chaude.

En profondeur, sous le gley limono-argileux, se trouvent généralement des lits sableux, signalés dans l'introduction, correspondant aux premiers remplissages des cuvettes.

Ces lits sableux, gorgés d'eau, tranchent, davantage que dans les profils précédents, avec les horizons qui leur sont supérieurs. En effet, à mesure que le sol devient plus hydromorphe, la granulométrie des horizons proches de la surface s'affine. Cela est dû aux faibles courants des eaux d'inondation qui, déjà débarrassées des sables qu'elles véhiculaient, déposent des éléments fins.

L'appellation locale de ce profil est « tany-manga », elle signifie terre bleue et argileuse et montre que les indigènes prennent, eux aussi, le gley pour horizon de diagnostic.

Le profil est du type A. g. Gr. (A représente l'horizon organique, g le pseudogley et Gr le gley réduit).

Il peut être aussi du type A. Go. Gr.

L'horizon A, présentant des taches, pourrait être désigné par les lettres Ag.

\* Actuellement, la tendance est de nommer « gley » un horizon obligatoirement réduit. En fait, l'appellation « gley oxydé » est utilisée ici pour désigner un stade intermédiaire entre le pseudogley et le gley.

\*\* Au code MUNSSELL, cet horizon est : 7,5 YR 2/0.

\*\*\* B 90 correspond à 10 YR 6/1, au code MUNSSELL.

#### 4) SOL SEMI-TOURBEUX \*

La végétation est plus dense et plus haute que celle correspondant au profil précédent. En effet, les *Cyperus emyrensis*, qui ont une grande taille, font leur apparition.

Ce sol est, pendant plus de la moitié de l'année, gorgé d'eau en surface.

0 à 25 cm :

Horizon gris très foncé (J 10) présentant des taches brun-rouge, témoignant d'une période d'oxygénation au cours de la saison sèche \*\*.

L'horizon est caractérisé par une grande abondance de racines fonctionnelles et de débris organiques mal décomposés tendant à rendre la structure fibreuse. Il existe aussi des matières organiques fines. Les débris étant très ramollis et les fractions limoneuses et argileuses abondantes, l'ensemble est plastique et collant.

25 à 50 cm :

Horizon de même couleur, encore riche en racines fonctionnelles. Les débris végétaux sont rares, mais la matière organique fine, bien mélangée à la fraction minérale, est assez abondante. Les taches sont peu individualisées. L'ensemble, très collant et très plastique, a un aspect massif.

50 cm et plus :

Gley analogue à celui décrit dans le profil précédent. Il a toutefois généralement une granulométrie plus fine. Il repose toujours sur des horizons sableux.

Dans ce profil, l'amplitude du battement de la nappe est voisine de celle observée dans le profil précédent. Par contre, ici, tous les horizons ont une phase annuelle d'engorgement par l'eau qui domine sur la phase d'aération. Il résulte, en surface, une accumulation partielle des matières végétales que reçoit le sol.

Une partie de ces matières végétales s'altère pour donner des matières organiques fines qui se déplacent *per descensum*. Le mouvement se réalise lorsque les sols forment en saison des pluies une boue très fluide, grâce aux forces de gravité (chute de particules fines, d'une densité supérieure à celle de l'eau, dans l'eau).

Il y a aussi des migrations sous forme de complexes : argile-matières organiques ou fer-matières organiques.

Les passages entre les horizons organiques de ce profil sont progressifs.

La désignation des horizons suivant la nomenclature internationale est : (Ao). A 1. Gr. [(Ao) désigne l'horizon organique supérieur, mal décomposé, pratiquement superposé aux autres horizons ; A 1 l'horizon organique sous-jacent dans lequel la matière organique est bien mélangée à la fraction minérale ; Gr le gley réduit.]

Les lettres Ao et A 1 pourraient être suivies de la lettre g ou G pour souligner leur hydromorphie.

L'alimentation en eau de la nappe se fait par les pluies tombant sur le profil et par les eaux ruisselant des sols voisins ou s'y étant infiltrées.

#### 5) SOL TOURBEUX

La végétation très dense et très haute de Cypéracées fournit une énorme masse de matières organiques qui s'accumulent et permettent, en fonction de leur taux et de leur degré d'altération, de distinguer les horizons suivants :

0 à 60 cm :

Couche gris très foncé (J 41), constituée de racines fonctionnelles disposées verticalement et de débris organiques grossiers \*\*\*. L'ensemble, d'aspect fibreux, forme une trame lâche, très poreuse, dans laquelle se trouvent des matières organiques plus fines et un pourcentage peu élevé d'éléments minéraux, représentés surtout par du limon et de l'argile.

\* Ces sols peuvent être appelés : sols humiques à gley.

\*\* J 10 correspond à 2,5 YR 2/0, au code MUNSELL.

\*\*\* J 41 correspond à 2,5 YR 2/4, au code MUNSELL.



60 à 100 cm :

Racines non fonctionnelles, se tassant en prenant la forme d'un S aplati. Leur enveloppe externe est désagrégée au point de disparaître. Il reste alors la partie centrale cylindrique, fibreuse, dure, ayant sur toute sa longueur environ 2 mm de diamètre.

Les teneurs en matières organiques fines, en limon et en argile restent faibles.

Cet horizon et le précédent constituent une trame fibreuse, rigide à l'état sec, souple à l'état humide. Nous les appelons « **horizons de racines grossières** ».

100 à 200 cm :

C'est un horizon gris très foncé (J 10), intermédiaire entre les précédents et l'horizon organique profond qui est dépourvu de débris grossiers. Les débris organiques sont ici fragmentés, ramollis et désagregés. Progressivement, la structure fibreuse disparaît et la fraction minérale augmente. Nous l'appelons « **horizon de débris de racines** ».

200 à 280 cm :

Horizon encore gris très foncé, constitué d'un mélange intime de matières organiques fines, de limon et d'argile. Il est collant, plastique et forme une boue plus ou moins liquide avec l'eau. La proportion d'éléments minéraux est plus grande que dans les horizons précédents. C'est l'« **horizon de matières organiques fines** ».

280 cm et plus :

A nouveau un gley réduit, identique à celui du profil précédent, qui est très peu organique.

L'épaisseur des divers horizons de ce profil est variable. En effet, pendant les pluies, les horizons organiques s'étirent. La surface du sol a tendance à suivre la remontée du toit de la nappe, ce qui évite aux Cypéracées d'être intégralement noyées. Cette remontée peut entraîner, en période cyclonique, une rupture du profil au niveau de l'horizon de débris de racines. Les horizons de racines grossières deviennent alors flottants.

L'élasticité des horizons organiques permet à la surface du sol, par tassement, de rester gorgée d'eau pendant la majorité de la saison sèche.

Les matières fines, d'origine végétale, sont abondantes sous les horizons de débris grossiers. Elles dérivent de ces débris par altération, puis tombent en profondeur à travers la trame fibreuse.

Le profil semi-tourbeux contribue partiellement à enrichir les horizons organiques profonds du profil tourbeux en éléments organiques fins. L'enrichissement se produit en période d'inondation, lorsque les horizons organiques des deux profils sont dilatés, donc lâches, et que le courant oblique de l'eau qui circule au-dessus de l'horizon de gley est assez intense pour déplacer les éléments organiques fins.

Dans les cas extrêmes, le transport prend l'allure d'une coulée boueuse.

Le profil tourbeux peut être désigné par les lettres suivantes : Ao. (Ao). A 1. Gr. [Ao correspondant aux deux horizons fibreux, (Ao) à l'horizon de débris de racines de plus en plus fins vers la profondeur, A 1 à l'horizon dans lequel la matière organique fine est mélangée au limon et à l'argile. Ao, (Ao) et A 1 peuvent être tous suivis de la lettre Gr.]

L'ensemble des descriptions qui viennent d'être données montre que les sols choisis pour définir la chaîne sont nettement différenciés les uns des autres.

## II) CARACTERES ANALYTIQUES DES DIVERS PROFILS DE LA CHAÎNE

Les résultats seront exposés sous forme de graphiques qui permettent, mieux que des tableaux, de suivre les variations d'un élément dosé dans les divers horizons d'un même profil et d'un profil à l'autre.

Avant d'examiner les résultats obtenus, il importe de définir sommairement les principales techniques analytiques utilisées, puisque leur connaissance est indispensable à toute interprétation. Les détails des méthodes, ou leurs références bibliographiques, seront donnés en annexe.

## A) DEFINITION SOMMAIRE DES TECHNIQUES ANALYTIQUES

### 1) PREPARATION DES ECHANTILLONS

Les analyses sont réalisées sur de la terre séchée à l'air qui forme généralement des mottes. Les mottes sont disloquées au rouleau en caoutchouc, puis la terre est passée au tamis de 2 mm d'ouverture de maille. Dans les sols que nous étudions il n'y a presque jamais de refus minéraux ; par contre, les refus organiques sont souvent abondants. Les refus organiques sont déchiquetés au broyeur à hélice jusqu'à ce qu'ils passent au tamis de 2 mm, puis mélangés à la fraction minérale qui leur correspond. C'est sur ce mélange que sont pratiquées les analyses.

### 2) ANALYSE MECANIQUE

Pour l'analyse granulométrique, les refus organiques obtenus au tamis sont éliminés. En effet, avant détermination des diverses fractions texturales, la matière organique doit être détruite par action de l'eau oxygénée.

Le dispersant utilisé est  $\text{NH}_4\text{OH}$  et la séparation des particules a lieu par la méthode du piquetage, préconisée par ROBINSON.

### 3) ELEMENTS ORGANIQUES

#### a) MATIERE ORGANIQUE TOTALE

Elle est calculée à partir de la valeur du carbone organique obtenue par la méthode ANNE. Dans cette méthode, compte tenu des fortes teneurs en matières organiques, le bichromate de potassium est ajouté sous forme cristallisée pour permettre une oxydation totale des matières organiques.

#### b) AZOTE TOTAL

La méthode est celle de KJELDAHL, modifiée pour inclure dans le dosage l'azote des nitrates.

#### c) HUMUS

Les acides humiques sont dosés suivant la méthode CHAMINADE. Elle utilise comme extractif l'oxalate d'ammonium qui dissout bien les humates calciques mais mal les humus acides. Cette méthode a été la première utilisée par les pédologues travaillant à Madagascar.

### 4) CARACTERES DU COMPLEXE ABSORBANT

#### a) SOMME DES BASES ECHANGEABLES

Les cations échangeables ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) sont extraits à l'acétate d'ammonium et les dosages réalisés au spectrophotomètre de flamme.

#### b) CAPACITE D'ECHANGE TOTALE

Après extraction des cations échangeables, élimination de l'acétate d'ammonium non retenu par le complexe, les ions ammonium fixés par le complexe sont déplacés par l'ion  $\text{H}^+$ , puis dosés par distillation.

### 5) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

Les pH sont obtenus par mesure électrométrique au pH mètre, dans une suspension de terre dans l'eau. En adoptant le rapport sol/eau = 1/2,5 (exprimé en poids), les terres très organiques absorbent toute l'eau sans donner de boue. Il convient donc de choisir un rapport deux ou trois fois plus faible.

Le pouvoir tampon correspond à la quantité de soude ajoutée à la suspension de terre pour l'amener à la neutralité.

### 6) ETUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE

Cette fraction correspond aux éléments inférieurs à 2  $\mu$ , obtenus après destruction de la matière organique et dispersion des agrégats.

Les échantillons à analyser sont saturés par  $\text{NH}_4$ , mais  $\text{NH}_4$  peut être à volonté remplacé par les cations  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ , etc.

La fraction inférieure à 2  $\mu$  est passée successivement :

- aux rayons X (les raies obtenues sont enregistrées sous forme de graphique facilitant l'interprétation) ;
- à l'analyse thermique différentielle ;
- à la thermobalance.

## 7) ETAT DU FER

Le fer total est dosé après attaque triacides (méthode HARDY et BAEYENS).

Le fer libre est déterminé par la méthode DEB.

Le fer ferreux est mis en évidence par des tests rapides (réactif de COMBER ou celui d'EMERSON, tous deux à base de sulfocyanure de potassium dissous dans de l'alcool ou dans de l'acétone additionnée d'éther. Ces réactifs permettent, par échange, de faire passer en solution les sels ferriques colorant en rouge le sulfocyanure).

## 8) RAPPORT SILICE/ALUMINE

Déterminé après attaque triacides, suivant les principes de la méthode HARDY et BAEYENS.

## B) RESULTATS ANALYTIQUES OBTENUS

### 1) GRANULOMETRIE

Nous donnons ci-dessous (fig. 15) des graphiques résumant les valeurs texturales des cinq profils caractéristiques de la chaîne de sols étudiés.

Sur ces graphiques, nous présentons :

- les pourcentages exprimés en poids : de sable grossier, de sable fin, de limon et d'argile ;
- le pourcentage exprimé en poids de matières organiques totales ;

le pourcentage de l'eau contenue dans l'échantillon, préalablement séché à l'air, ayant servi à déterminer la granulométrie et les taux de matières organiques. L'échantillon séché à l'air est pour cela passé à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant.

La somme de ces différents pourcentages est égale à 100, puisque les terres ne possèdent pas de carbonates.

Dans les premiers maillons de la chaîne, la granulométrie est très variable avec la profondeur. Le profil est constitué de couches hétérogènes bien visibles à l'œil. A mesure que l'hydromorphie croît, l'hétérogénéité s'estompe par un affinage des dépôts minéraux. Cet affinage est provoqué par la végétation qui rompt les courants des eaux d'inondation et provoque la chute des matériaux grossiers qu'elles transportent, en amont des surfaces occupées par les Cypéracées.

Les graphiques montrent que, dans les premiers maillons de la chaîne de sols, la somme des sables grossiers et des sables fins est assez forte. Ils font apparaître l'abondance de la fraction limoneuse dans l'ensemble des profils.

Notons que dans le « sol à gley réduit » l'horizon de gley se différencie peu par sa texture de ses voisins. Il constitue un ensemble compact à la suite du colmatage de ses pores par les éléments fins.

### 2) ELEMENTS ORGANIQUES

Les graphiques de la figure 15 mettent bien en évidence les variations des teneurs en matières organiques totales au sein d'un même profil et d'un profil à l'autre.

Ces variations seront cependant retranscrites sous forme de courbes tracées suivant les principes d'une méthode dont nous généraliserons l'utilisation dans la suite du texte. Elle facilitera la comparaison entre les divers éléments organiques (matières organiques totales, azote, humus) dans l'ensemble de la chaîne de sols.





## PRINCIPE D'ETABLISSEMENT DES COURBES

(Voir graphiques ci-dessous : fig. 16 et 16 bis, 17 et 17 bis).

Pour chaque élément pris en considération (matière organique totale, azote, C/N, humus, taux d'humification), deux coordonnées sont tracées. En abscisse, à des distances égales, sont portés cinq repères verticaux qui représentent chacun un type de sol de la chaîne étudiée. En ordonnée, figure l'échelle des valeurs que peut prendre l'élément dosé (par exemple : 0, 20, 40, 60 et 80 % de matière organique totale).

Pour un profil de la chaîne, chacun de ses horizons présente une valeur correspondant à l'élément dosé. Ces valeurs sont inscrites sur le graphique à l'aide d'une croix placée, compte tenu de l'échelle des valeurs de l'ordonnée, sur la droite verticale menée à partir du repère représentatif du profil. (Exemple : l'horizon de surface du sol « semi-tourbeux » possède 30 % de matière organique totale et l'échelle de l'ordonnée est la suivante : 10 % de matière organique totale sont représentés par 1 cm. Pour porter cette valeur, nous traçons une verticale à partir du point de repère du sol « semi-tourbeux » figuré sur l'abscisse et, à 3 cm de cette abscisse, nous marquons une croix.)

En reliant entre elles les croix correspondant, par exemple, aux horizons de surface des divers profils, nous obtenons une courbe figurant la variation de l'élément dosé en surface de la chaîne de sols.

Il conviendra de considérer :

la courbe relative à l'horizon organique de surface de l'ensemble des profils de la chaîne (les prélèvements ont lieu dans les 5 ou 10 premiers centimètres du sol) ;

dans le cas des profils à épaisse accumulation de matière organique, la courbe précédente sera complétée par celle relative à l'horizon organique le plus profond. C'est ainsi que, pour le sol semi-tourbeux, nous distinguerons : l'horizon constitué de matière organique assez grossière et celui présentant une matière organique plus fine ; pour le sol tourbeux, nous retiendrons : l'horizon de racines grossières et l'horizon riche en matière organique fine, mélangée à l'argile ;

la courbe se rapportant à l'horizon non organique situé juste au-dessous de la partie organique du profil.

Les valeurs portées en ordonnées sont en premier lieu exprimées par rapport à un poids de terre, puis par rapport à un volume de terre.

## a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS

(fig. 16 et 16 bis)

Ces courbes, qui schématisent, d'une part, la variation d'un élément d'un profil à l'autre de la chaîne, d'autre part la variation d'un élément, en fonction de la profondeur, dans un même profil, conduisent aux conclusions suivantes :

 $\alpha$ ) VARIATION DANS LA CHAÎNE DE SOLS AVEC UNE HYDROMORPHIE CROISSANTE

L'hydromorphie provoque une augmentation progressive et forte :

des teneurs en matière organique totale,  
des teneurs en azote total,  
des teneurs en humus,  
du rapport C/N.

En ce qui concerne les taux d'humification, l'hydromorphie provoque dans les horizons de surface un accroissement puis une baisse des valeurs, le taux le plus élevé correspondant au « sol à gley réduit ».

Dans les horizons organiques profonds, la courbe a la même allure, mais c'est le « sol semi-tourbeux » qui présente la valeur la plus forte.

En se référant au graphique schématisant les caractères morphologiques de la chaîne de sols hydromorphes \*, on constate que le taux d'humification est lié non seulement au pourcentage de matière organique contenue dans l'horizon, mais aussi au degré de finesse de cette matière organique.

Le gley d'un « sol tourbeux » est légèrement plus riche en matière organique, en humus et possède un taux d'humification un peu plus élevé que le gley d'un « sol à gley réduit ».

\* Voir figure 14.

# ÉLÉMENTS ORGANIQUES EXPRIMÉS PAR RAPPORT A UN POIDS DE TERRE SÉCHÉE A 105°

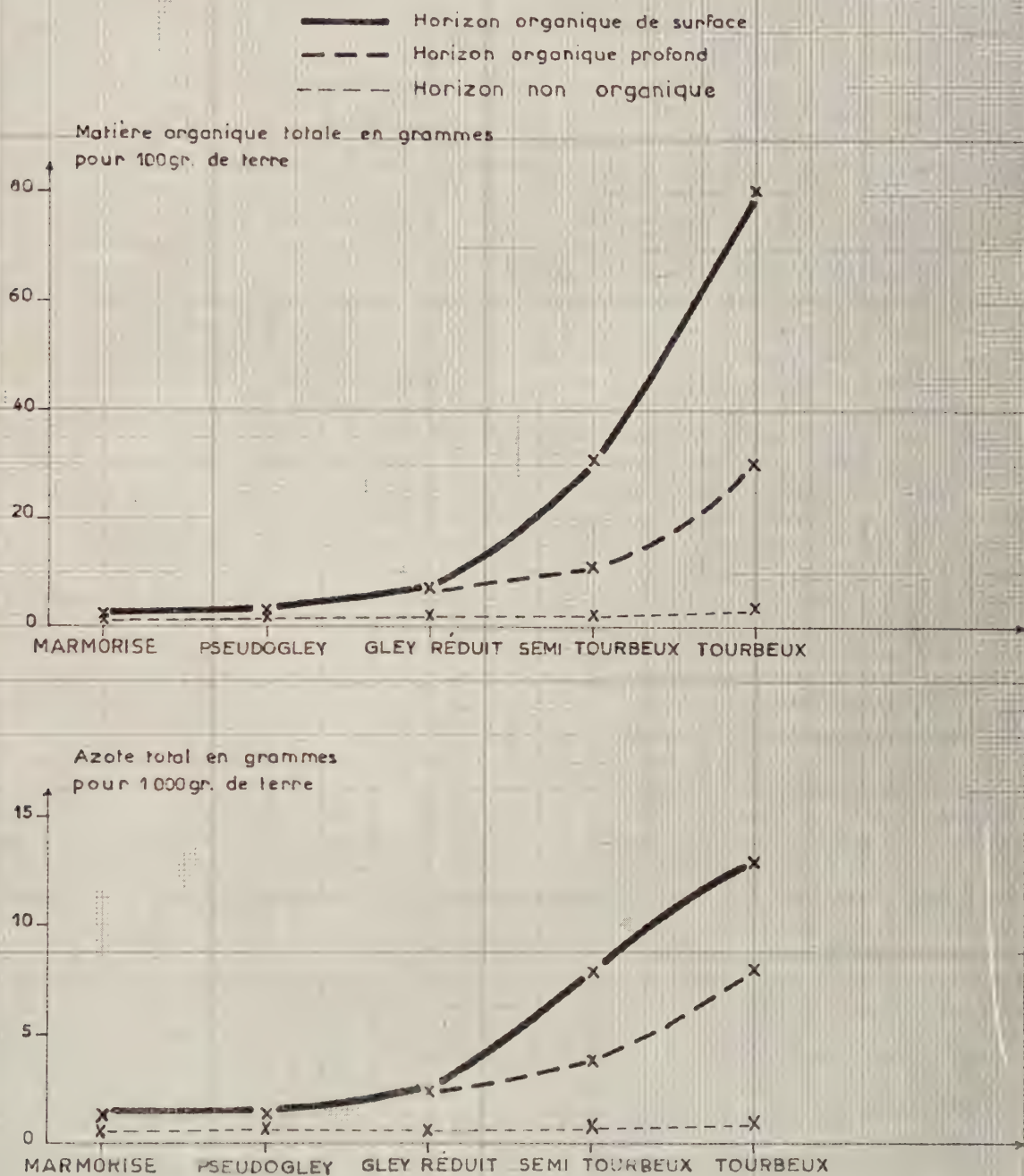


Figure 16



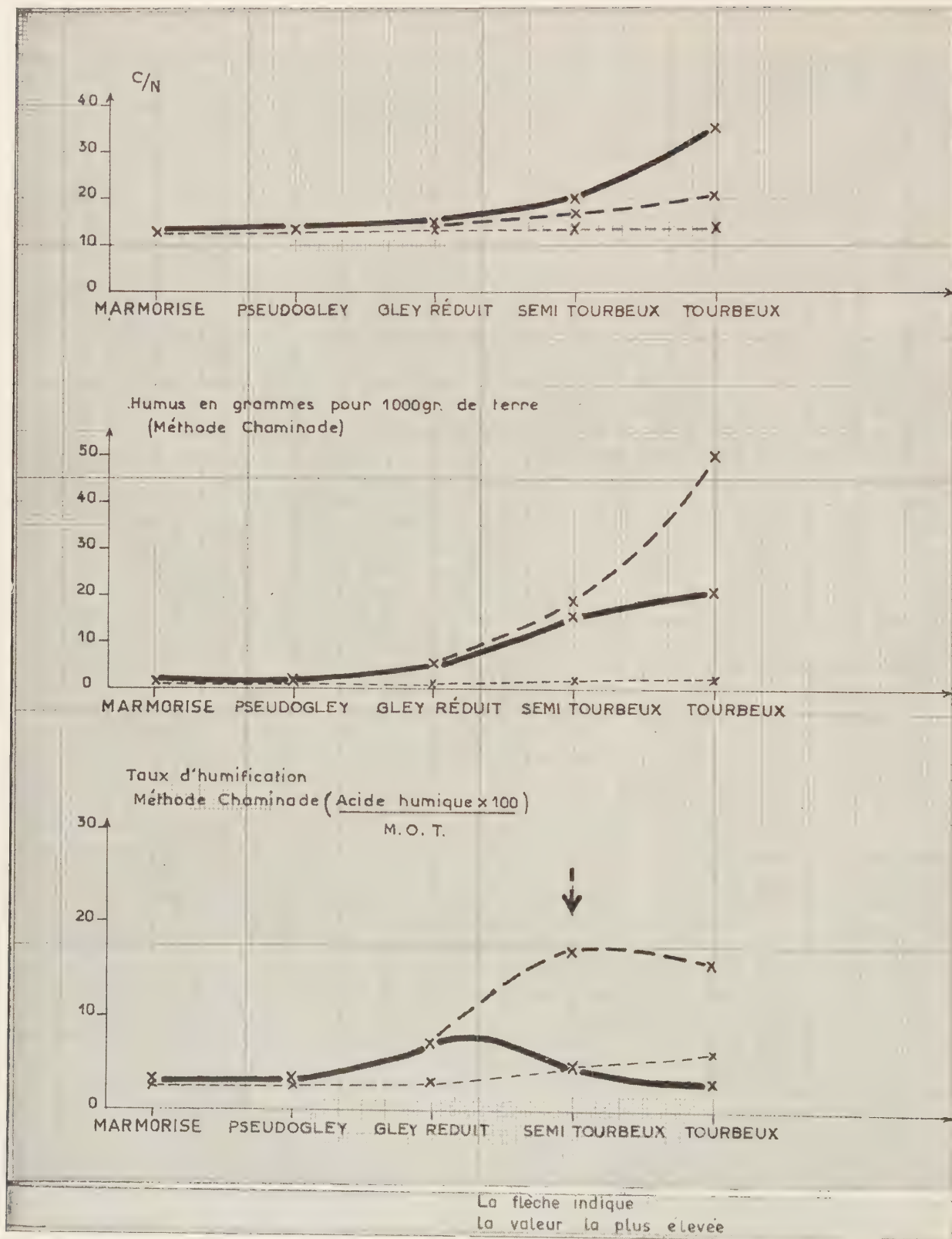


Figure 16 bis

### β) VARIATION AU SEIN D'UN MEME PROFIL

Pour tous les profils étudiés, il y a, de leur sommet à leur base, décroissance régulière :

- de la matière organique totale,
- de l'azote total.
- du C/N.

L'humus ne suit pas cette variation et ce sont les horizons organiques profonds des sols très hydromorphes (semi-tourbeux et tourbeux) qui présentent les valeurs les plus élevées.

### b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME

Pour les sols peu organiques, les résultats analytiques sont, dans la pratique courante, donnés par rapport à un poids. Les densités apparentes de ces divers sols variant dans de faibles limites, il est permis, sans faire d'erreur, de considérer que les divers résultats exprimés par rapport à une unité de poids conservent entre eux la même hiérarchie que celle qui serait établie à partir d'une expression par rapport à un volume.

Pour les sols étudiés ici, les fortes teneurs en matières organiques que présentent certains horizons font que les densités apparentes varient dans une large mesure et qu'ainsi les conclusions d'ensemble obtenues à partir de résultats exprimés par rapport à un poids différent de celles tirées d'une expression par rapport à un volume.

La plante, qui a un système racinaire à extension limitée, ne peut exploiter qu'un certain volume de sol. Il importe par conséquent, en agronomie, de connaître la quantité d'éléments nutritifs contenus dans ce volume et donc de préférer l'expression des résultats faite par rapport à une unité de volume à celle faite par rapport à une unité de poids.

Les courbes qui suivent (fig. 17 et 17 bis) concernent la valeur des densités apparentes \*, puis l'expression en volume des résultats déjà fournis par rapport à une unité de poids.

Pour transformer la valeur d'un élément exprimée par rapport à un poids en valeur exprimée par rapport à un volume, nous opérons comme suit :

si nous avons, par exemple, 80 g de matières organiques totales pour 100 g de terre, dans un sol dont la densité apparente est de 0,2 à l'état humide, nous écrivons :

80 g correspondent à 100 g de terre

donc 80 g correspondent à  $\frac{100}{0,2} = 500 \text{ cm}^3$  de terre ;

pour 100 cm<sup>3</sup>, nous aurons donc :  $\frac{80 \times 100}{500} = 16 \text{ g}$  de matières organiques

totales,

ou, plus simplement :  $80 \times 0,2 = 16 \text{ g}$ .

L'examen de ces courbes conduit aux conclusions suivantes :

### α) VARIATION DANS LA CHAÎNE DE SOLS AVEC UNE HYDROMORPHIE CROISSANTE

Les densités apparentes décroissent régulièrement et fortement dans les horizons organiques.

Il en résulte que les courbes obtenues pour la matière organique totale, l'azote et l'humus sont bien moins redressées vers la verticale que celles établies pour ces mêmes éléments avec une expression donnée par rapport à un poids. Autrement dit, les différences observées d'un profil à l'autre s'estompent.

Il arrive même, dans les horizons organiques de surface, que la matière organique totale, l'azote et l'humus croissent seulement jusqu'au « sol semi-tourbeux », puis qu'il y ait une chute de ces valeurs dans le « sol tourbeux ».

Les C/N et les taux d'humification restent les mêmes, quel que soit le mode d'expression.

\* La densité apparente est déterminée pendant la saison des pluies, qui est la période culturale. Le sol est, à cette époque, humide et même gorgé d'eau lorsque l'hydromorphie est intense.

Les prélèvements ont lieu à l'aide d'un cylindre d'un litre, possédant à son extrémité des dents de scie, permettant par rotation de couper les éléments organiques fibreux. Le sol prélevé est séché à l'étuve puis pesé.

# ÉLÉMENTS ORGANIQUES EXPRIMÉS PAR RAPPORT A UN VOLUME DE SOL HUMIDE

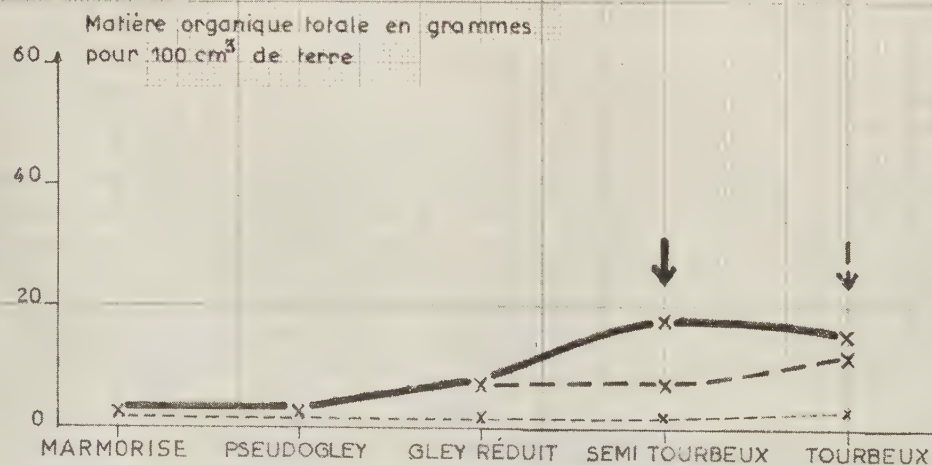
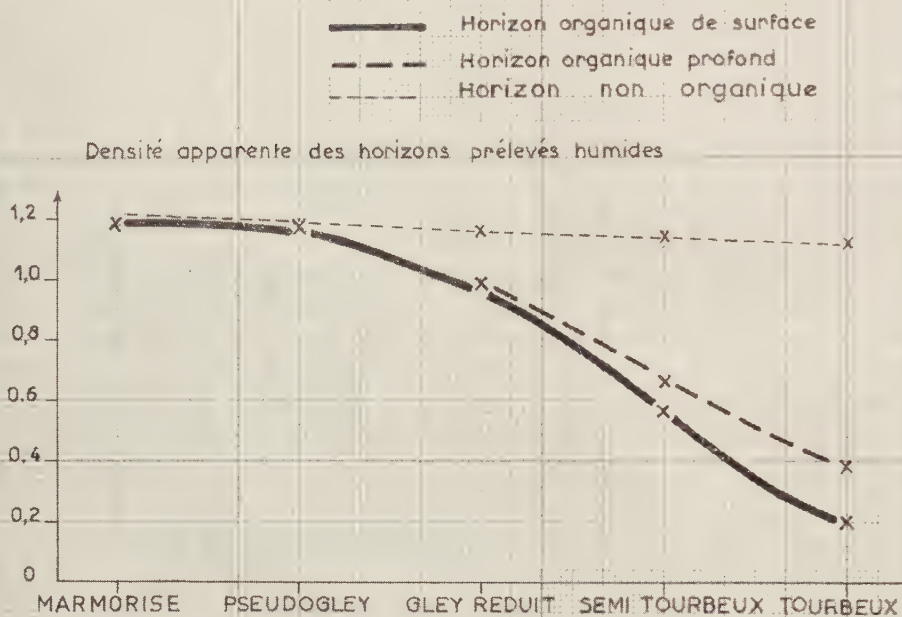


Figure 17



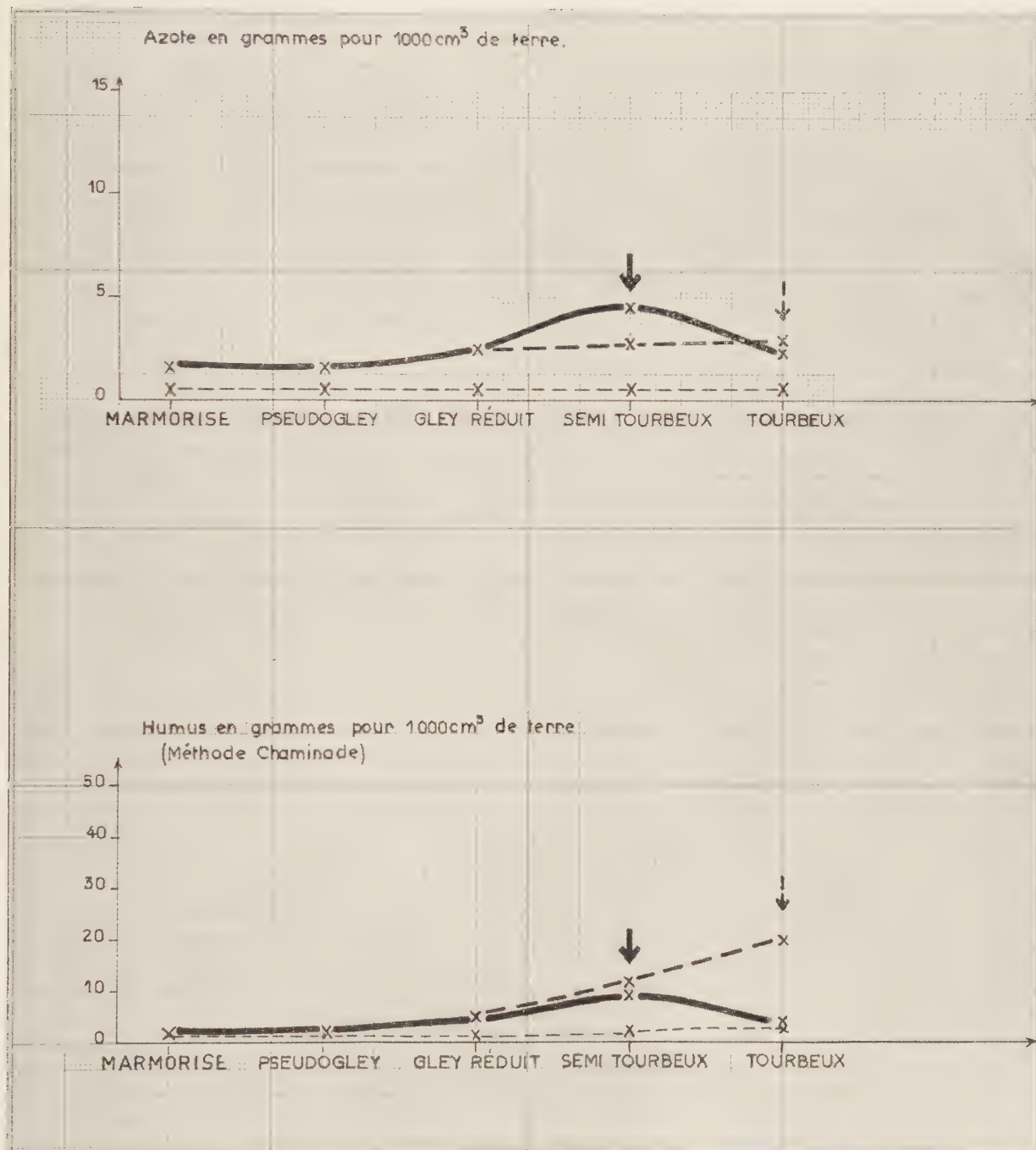


Figure 17 bis

β) VARIATION AU SEIN D'UN MEME PROFIL.

Il y a encore généralement, comme dans l'expression par rapport à un poids, décroissance en profondeur de la matière organique totale et de l'azote.

Cette décroissance est moins marquée et même, dans le profil tourbeux, les valeurs correspondant à l'horizon organique de surface et à l'horizon organique profond présentent l'amorce d'une inversion.

Pour l'humus, ce sont encore les horizons organiques profonds qui présentent les valeurs les plus fortes.

**En résumé**, l'expression des résultats par rapport à une unité de volume montre que les sols hydromorphes ne sont pas aussi riches en éléments organiques que le laissent supposer les résultats exprimés par rapport à un poids.

Si nous considérons, d'une part, les résultats donnés par rapport à une unité de volume et, d'autre part, les variations du taux d'humification, nous constatons que le « sol semi-tourbeux » se distingue par d'excellentes valeurs concernant les éléments organiques. C'est, en effet, lui qui présente en surface les meilleures teneurs en matière organique totale, en azote et en humus. Ses taux d'humification, déjà assez élevés en surface, s'accroissent très rapidement dans l'horizon organique sous-jacent.

Remarquons que le « sol à gley réduit » présente en surface un taux d'humification particulièrement élevé et un C/N de l'ordre de 15, qui témoignent d'une bonne évolution des matières organiques.

C'est donc pour un hydromorphie comprise entre celle que subit un « sol à gley réduit » et celle que subit un « sol semi-tourbeux » qu'une plante à enracinement superficiel rencontrera les conditions les plus favorables concernant les éléments organiques. C'est le cas du riz dont la majorité des racines explorent les quinze premiers centimètres du sol.

### 3) COMPLEXE ABSORBANT

Nous établissons des courbes pour la capacité d'échange totale et la somme des bases échangeables, suivant les mêmes principes que ceux adoptés pour étudier les éléments organiques.

a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS

(fig. 18 et 18 bis)

Ces courbes conduisent aux conclusions suivantes :

α) VARIATION DANS LA CHAÎNE DE SOLS AVEC UNE HYDROMORPHIE CROISSANTE

La capacité d'échange totale augmente considérablement dans les horizons organiques mais reste pratiquement fixe dans le gley non organique.

La somme des bases échangeables présente, pour les horizons organiques, un point d'inflexion peu marqué, situé entre le « sol à gley réduit » et le « sol semi-tourbeux ». Cette somme décroît régulièrement dans les divers horizons non organiques mais la chute n'est nette que pour les premiers profils de la chaîne.

Quel que soit l'horizon considéré, il y a décroissance du taux de saturation.

β) VARIATION AU SEIN D'UN MEME PROFIL.

Parmi les horizons organiques, ce sont les plus profonds, riches en matière organique fine, qui présentent la meilleure capacité d'échange totale (T) et la meilleure somme des bases échangeables (S).

L'horizon non organique donne des valeurs inférieures pour T et S à celles correspondant aux horizons organiques. Cette différence est surtout marquée dans les profils très hydromorphes.

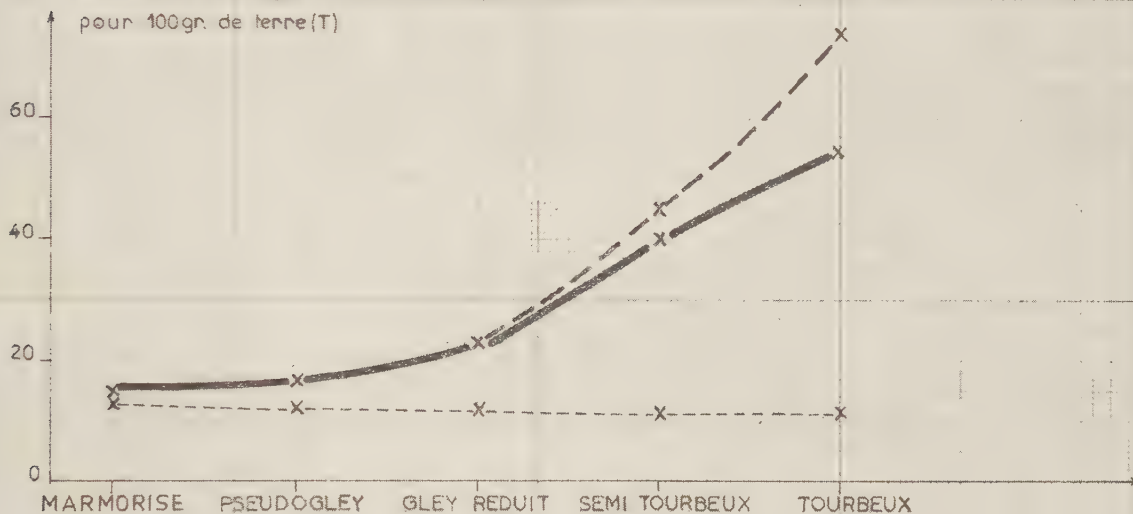
Les taux de saturation, peu variables pour les premiers profils de la chaîne, croissent nettement dans les horizons de gley non organique des « sols semi-tourbeux et tourbeux ».

**En résumé**, les sols tourbeux ont, dans leurs horizons organiques, une forte capacité d'échange, une somme des bases échangeables assez élevée, mais un faible taux de saturation.

# COMPLEXE ABSORBANT EXPRIMÉ PAR RAPPORT A UN POIDS DE TERRE SECHÉE A 105°

- Horizon organique de surface
- - - Horizon organique profond
- ..... Horizon non organique

Capacité d'échange totale en milliéquivalents  
pour 100gn. de terre (T)



Somme des bases échangeables en milliéquivalents  
pour 100gn. de terre (S)

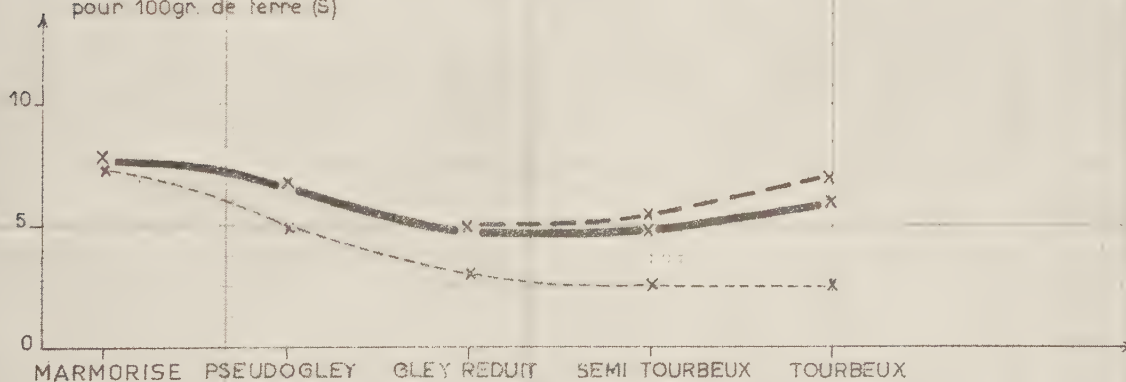


Figure 18



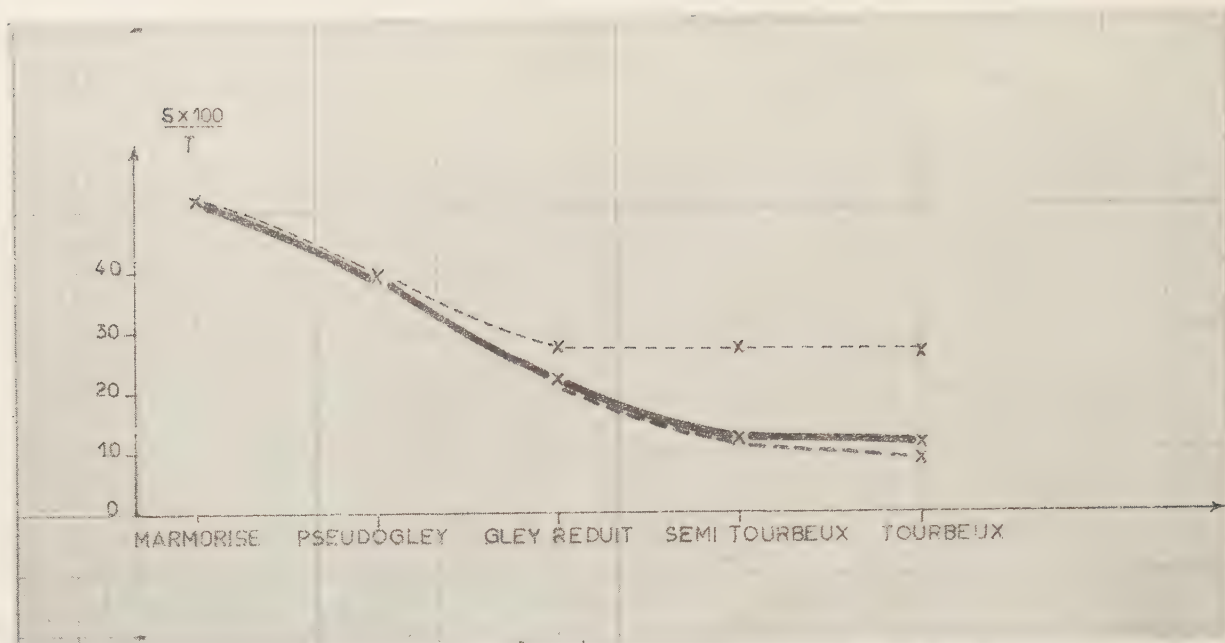


Figure 18 bis

## b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME

(fig. 19)

## α) VARIATION DANS LA CHAÎNE DE SOLS AVEC UNE HYDROMORPHIE CROISSANTE

En ce qui concerne la capacité d'échange totale, ce mode d'expression aplatit les courbes et a tendance à les incurver vers le bas, au niveau des « sols tourbeux ». On peut dire que T continue à croître avec l'hydromorphie, à la condition que la matière organique ne soit pas trop fibreuse.

La somme des bases échangeables ne présente plus une rupture de pente comme c'était le cas dans une expression par rapport à un poids. Elle décroît régulièrement quelle que soit la courbe considérée.

## β) VARIATION AU SEIN D'UN MEME PROFIL

La capacité d'échange totale reste, dans les « sols semi-tourbeux et tourbeux », plus élevée dans les horizons organiques profonds que dans les horizons organiques superficiels. Les horizons de gley donnent encore les valeurs les plus basses.

Dans le « sol tourbeux », S devient plus faible dans l'horizon de racines grossières que dans le gley.

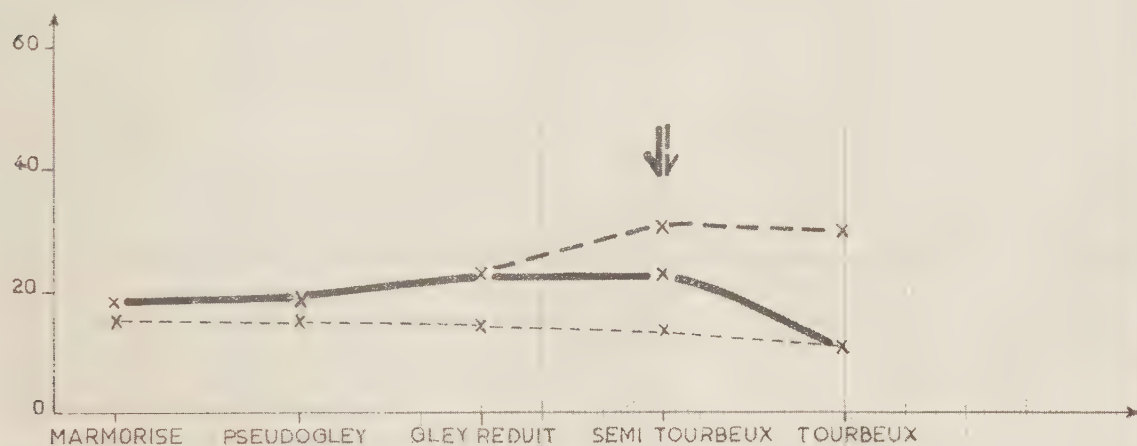
**En résumé,** le « sol à gley réduit » et le « sol semi-tourbeux » présentent en surface les meilleures capacités d'échange totales. De plus, ces sols ont, toujours en surface, des valeurs presque moyennes concernant la somme des bases échangeables et les taux de saturation.

Rappelons que ces mêmes sols présentaient d'excellents caractères relatifs aux éléments organiques. Ils devraient donc être favorables à une bonne production agricole.

# COMPLEXE ABSORBANT EXPRIMÉ PAR RAPPORT A UN VOLUME DE SOL HUMIDE

- Horizon organique de surface
- - - Horizon organique profond
- - - Horizon non organique

Capacité d'échange totale en milliéquivalents  
pour 100 cm<sup>3</sup> de terre



Somme des bases échangeables en milliéquivalents  
pour 100 cm<sup>3</sup> de terre



Figure 19

#### 4) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

##### α) ACIDITE

###### a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS

Plus le sol est hydromorphe, plus l'acidité augmente.

Le pH est de 5,5 dans les « sols marmorisés » et les « sols à pseudogley », de 5 dans les « sols à gley réduit » et de 4,5 dans les « sols semi-tourbeux et tourbeux ».

Les variations au sein d'un même profil sont faibles. Toutefois, les horizons organiques sont généralement plus acides, de quelques dixièmes d'unité pH, que les horizons non organiques.

###### b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME

Prendre un rapport sol/eau exprimé en volume au lieu d'un rapport sol/eau exprimé en poids revient, pour les sols à faible densité, à diminuer la quantité de terre mise en contact avec un même volume d'eau.

Au lieu d'adopter le rapport 1 g de sol dans 5 g d'eau, si nous considérons le rapport 1 cm<sup>3</sup> de sol humide dans 5 cm<sup>3</sup> d'eau, nous aurons, pour un sol dont la densité apparente est 0,4 : 0,4 g de terre dans 5 cm<sup>3</sup> d'eau.

Les modifications de la proportion du sol par rapport à l'eau dans le sens de la diminution du rapport sol/eau entraîne une légère augmentation du pH. C'est ainsi que, pour l'horizon riche en matière fine d'un « sol tourbeux », nous avons :

| Sol/eau<br>(g) | pH   |
|----------------|------|
| 1/5            | 4,3  |
| 1/10           | 4,35 |
| 1/20           | 4,50 |

Ainsi, les mesures de pH réalisées pour tous les sols, avec un rapport constant sol/eau exprimé en volume, rapprochent les valeurs trouvées pour les sols fortement hydromorphes de celles qui correspondent aux sols peu hydromorphes.

Le sens de la progression de l'acidité en fonction du degré d'hydromorphie des divers profils reste pourtant le même que celui que nous avons indiqué lorsque le rapport sol/eau est exprimé en poids.

##### β) POUVOIR TAMPON

###### a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS

Lorsque nous mesurons le pouvoir tampon d'un sol en suspension dans l'eau (1 g de sol dans 5 cm<sup>3</sup> d'eau) en ajoutant une solution de soude diluée jusqu'à ce que la neutralité soit atteinte, nous constatons : que, pour un horizon riche en matière fine, le volume de soude ajouté est considérable, ce qui revient à dire que le pouvoir tampon est élevé ; que, pour les horizons pauvres en matière organique ou constitués de matières organiques brutes, le pouvoir tampon est moins fort.

###### b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME

Malgré le poids de terre moins grand pris pour déterminer le pouvoir tampon dans le cas des sols à faible densité apparente, le sens de la variation que nous avons indiqué pour une expression par rapport à un poids reste le même.

Il faut 1,5 à 2 cm<sup>3</sup> de NaOH N/20 pour amener à la neutralité l'équivalent en gramme de 1 cm<sup>3</sup> d'horizons organiques non fibreux, appartenant aux profils « tourbeux » ou « semi-tourbeux ».

Un centimètre cube de NaOH N/20 suffit pour neutraliser l'équivalent en gramme de 1 cm<sup>3</sup> de sol provenant d'horizons organiques fibreux ou d'horizons peu organiques.

**En résumé,** l'hydromorphie augmente légèrement l'acidité des sols et leur confère généralement un plus fort pouvoir tampon.

#### 5) ETUDE MINERALOGIQUE DE LA FRACTION ARGILEUSE

Après avoir constaté que la capacité d'échange des sols est directement liée à leur richesse en éléments organiques fins, il importe de connaître le rôle des colloïdes minéraux dans la constitution du complexe. Ce rôle est, en effet, fondamental dans les horizons non organiques, que l'on rencontre dans l'ensemble des sols peu hydromorphes ou en profondeur des sols très hydromorphes (gley).



Lès argiles interviennent dans la valeur du complexe absorbant en fonction de leur pourcentage, exprimé par rapport au sol total\*, et en fonction de leur nature minéralogique. Le rôle de la nature chimique est fondamental puisque, par exemple, une montmorillonite présente une capacité d'échange dix fois plus forte qu'une kaolinite.

Les résultats analytiques obtenus proviennent de la fraction granulométrique fine du sol, constituée d'éléments possédant un diamètre inférieur à 2  $\mu$ . Nous appellerons cette fraction « fraction argileuse ».

Pour chaque échantillon étudié ont été établis des spectres aux rayons X, des courbes thermiques différentielles et des courbes thermopondérales.

L'ensemble des résultats expérimentaux constituant, pour ces déterminations, un volume trop important, il n'est pas encore possible de les reproduire ici. Nous allons en conséquence procéder de la manière suivante :

1) choisir un profil « semi-tourbeux » dont les caractères correspondent à un cas moyen des dépressions situées sur les hauts-plateaux. Pour ce profil, donner les résultats relatifs à l'horizon organique de surface et à l'horizon de gley, non organique. Ces exemples permettront de faire connaître les méthodes de travail utilisées :

2) commenter l'ensemble des spectres et courbes obtenues pour les divers horizons des divers profils constituant la chaîne hydromorphe typique rencontrée sur les hauts-plateaux ;

3) ensuite, pour relier les résultats relatifs aux sols hydromorphes à ceux des sols ferrallitiques des collines qui les entourent, donner les valeurs correspondant à l'horizon sous-jacent à l'horizon organique d'un sol ferrallitique. Cette référence permettra de mettre en évidence le rôle de l'hydromorphie sur la nature minéralogique des argiles ;

4) enfin, ayant obtenu, pour certaines dépressions situées dans l'ouest de l'Ile, des résultats très spéciaux, les illustrer en donnant les valeurs relatives à un horizon de gley appartenant à un « sol de gley réduit ». Soulignons que le climat, peu pluvieux, de l'Ouest n'est pas propice à l'extension des sols hydromorphes et que les surfaces marécageuses que l'on rencontre dans les deltas des grands fleuves sont largement alluvionnées par des matériaux provenant des hauts-plateaux. Elles ont ainsi une analogie minéralogique avec les sols ferrallitiques des collines des régions hautes ;

5) donner une conclusion d'ensemble relative à l'étude minéralogique.

#### a) PROFIL "SEMI-TOURBEUX" D'UNE DEPRESSION SITUÉE DANS LA RÉGION DU LAC ALAOTRA

(fig. 20 et 21)

Remarques concernant les courbes qui vont suivre :

pour l'étude aux rayons X, nous résumons à l'intérieur d'un encadrement les conditions dans lesquelles sont réalisées les mesures. En face de chaque raie caractéristique d'un minéral est porté le nom du minéral.

sur les courbes d'analyse thermique différentielle, la nature des minéraux responsables des crochets endothermiques ou exothermiques est précisée ;

les courbes concernant la thermobalance ont été, à l'origine, tracées sur du papier millimétré. Sur ce papier, une perte en poids (exprimée en % d'échantillon) de 50 mg (0 à 50 sur la coordonnée verticale) correspondait à 5 cm. Pour des raisons de présentation, ces courbes ayant été réduites, il est porté sous le nom de chaque minéral la valeur en centimètres correspondant à la perte en eau du minéral, mesurée sur le graphique non réduit. Cette valeur, multipliée par un coefficient exprimant la perte en eau caractéristique du minéral, fournit le pourcentage du minéral dans l'échantillon analysé.

Exemple :

kaolinite  $10,6 \text{ cm} \times 7,1 = 75 \%$ .

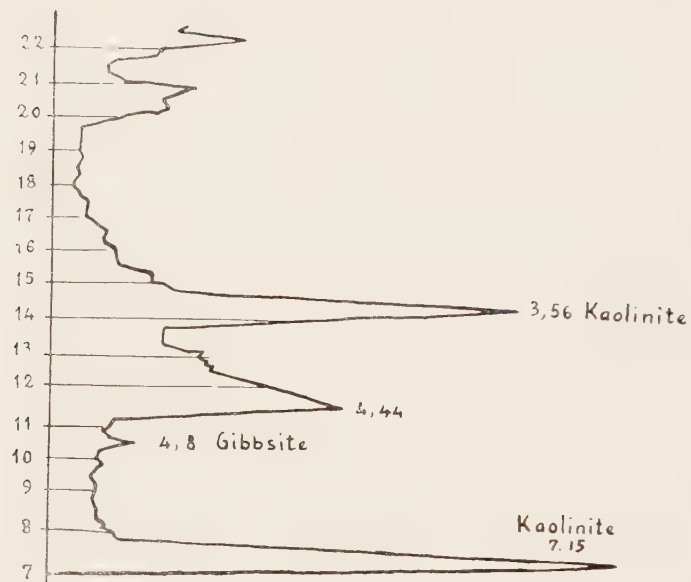
Le coefficient est ainsi calculé : la kaolinite perd 13,9 % de son poids entre 400 et 600°. Comme, sur la courbe, 1 cm correspond à 1 % de perte de poids, un échantillon composé de 100 % de kaolinite fournit un palier d'une hauteur de 13,9 cm. Ainsi, 1 cm correspond à  $100/13,9$ , soit 7,1 % de kaolinite.

Commentaires relatifs aux courbes obtenues :

l'horizon organique et le gley ont des caractères analogues. La fraction inférieure à 2  $\mu$  comporte de la kaolinite qui représente environ 3/4 de son poids et de la gibbsite qui représente le 1/20 de son poids ;

\* Se référer (fig. 15) au schéma donnant le pourcentage des éléments inférieurs à 2  $\mu$ , qui correspondent à l'argile au sens granulométrique.

## Rayons X



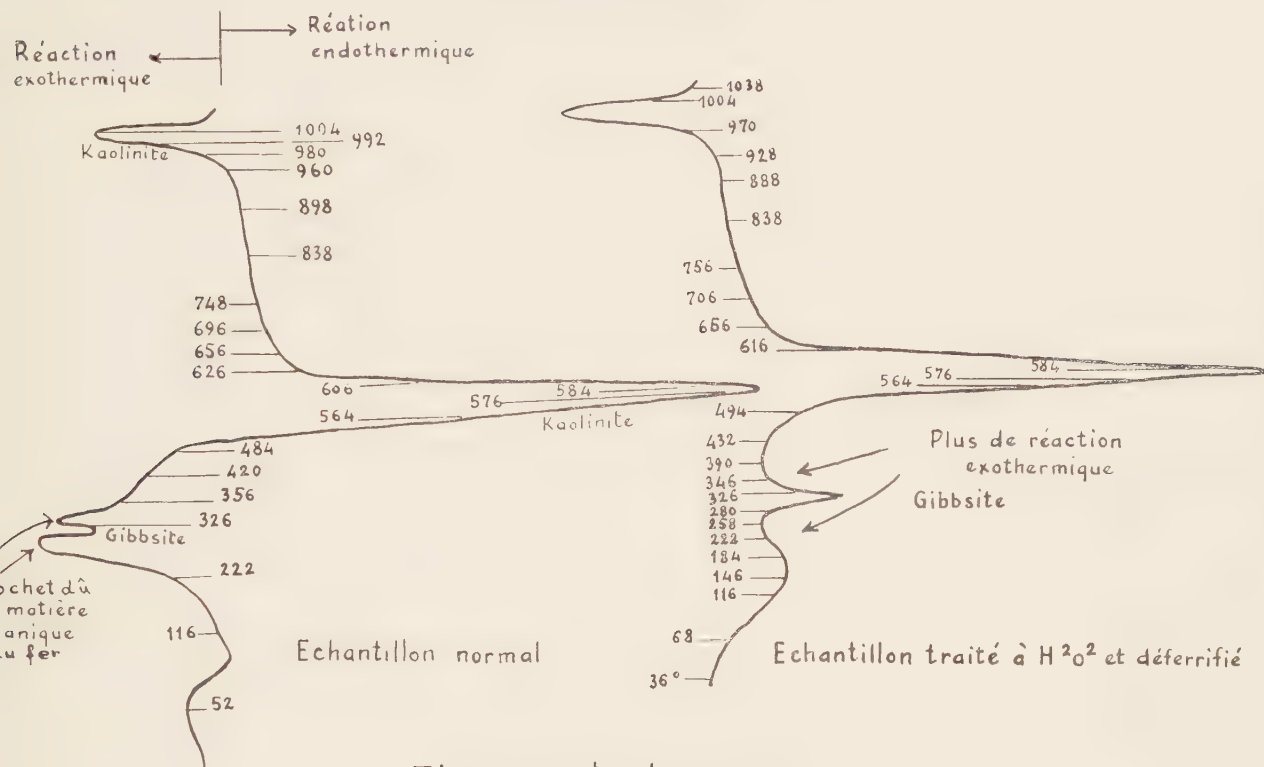
$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $3 \times 3 \times 2$   
 $3\text{ m}/10$   
 Anticathode Co



$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $0,75 \times 1,75 \times 2$   
 $5\text{ m}/10$   
 Anticathode Co

zon organique de surface

## Thermique différentielle



## Thermobalance

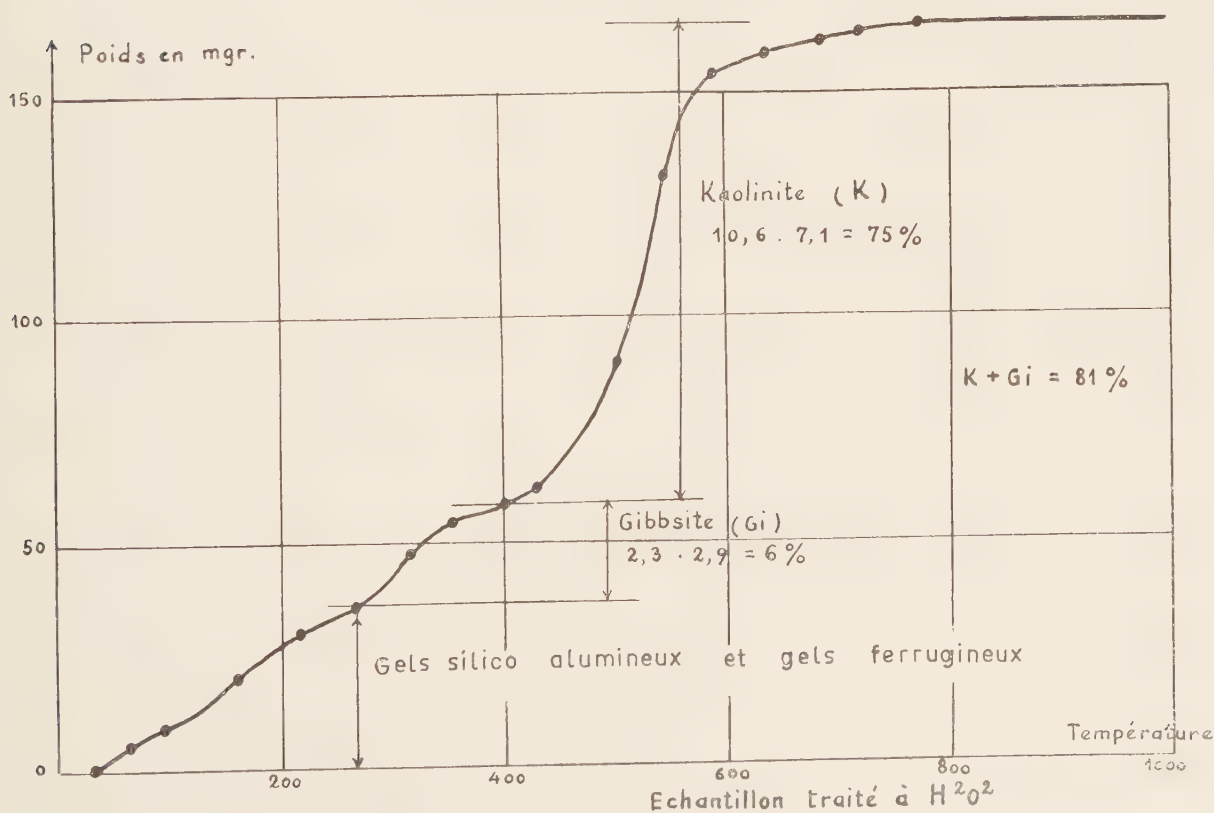
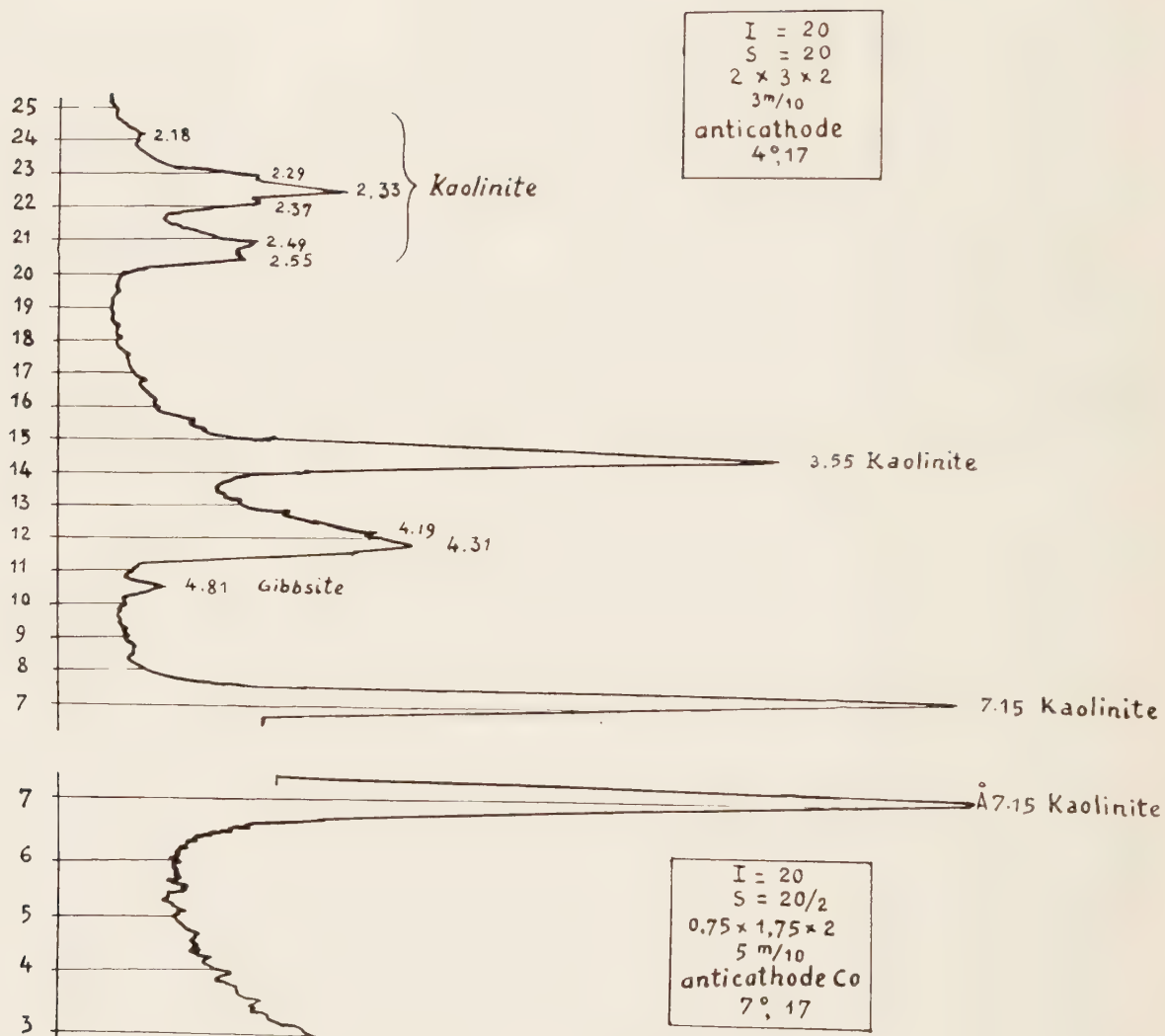


Figure 20

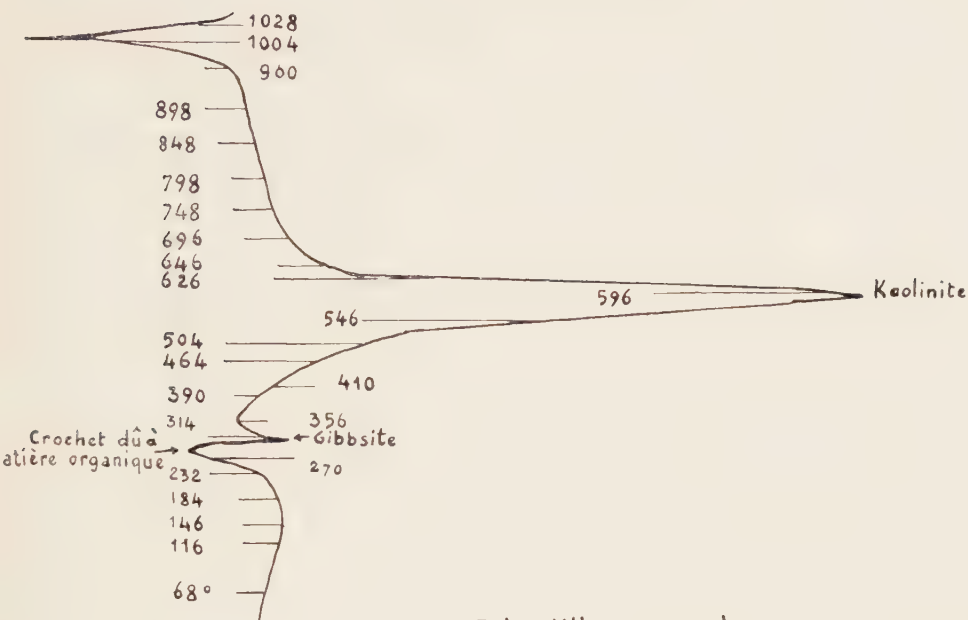


## Rayons X



zon de gley

# Thermique différentielle



Echantillon normal

## Thermobalance

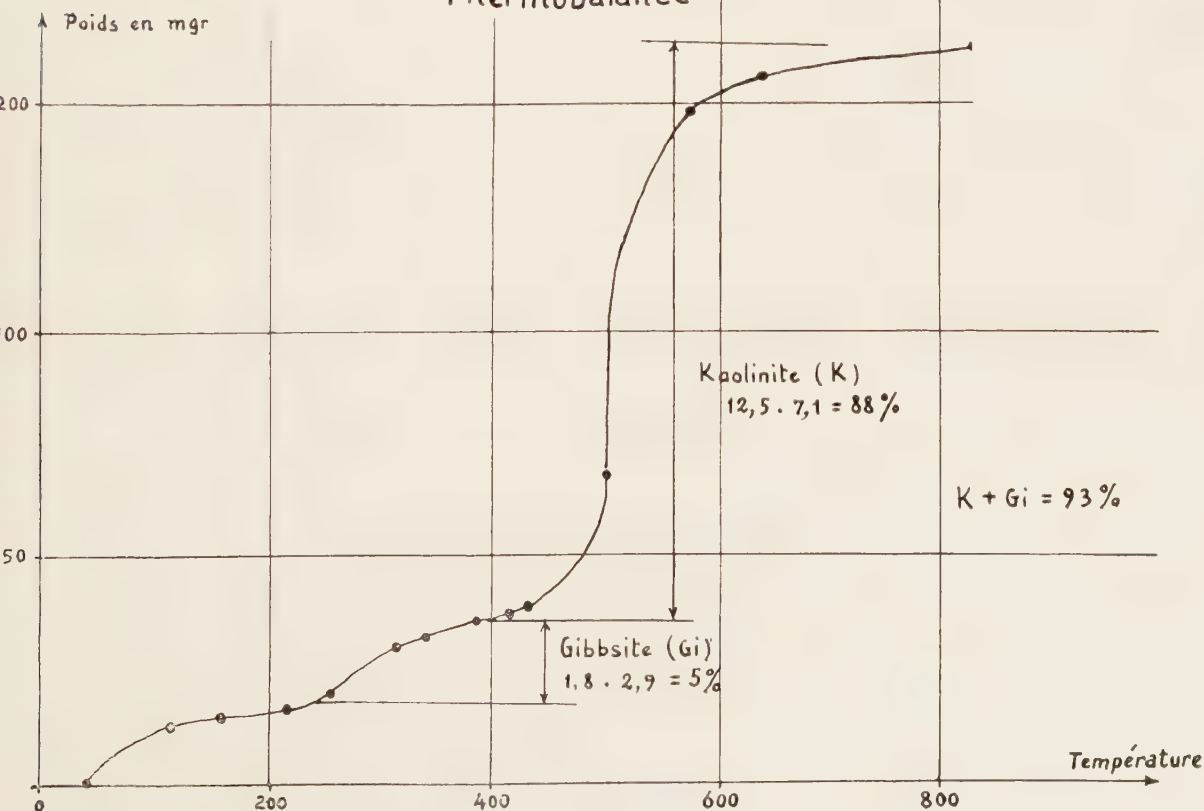


Figure 21

toutefois, l'horizon organique est plus riche en gels, vraisemblablement ferrugineux et silico-alumineux. La présence de composés ferrugineux nous est signalée par l'analyse thermique différentielle. En effet, la première courbe donnée montre un crochet exothermique de part et d'autre du crochet endothermique de la gibbsite. Sur un échantillon retraits longuement à l'eau oxygénée pour détruire la matière organique, ce crochet exothermique ne disparaît pas intégralement, alors qu'après élimination du fer il n'apparaît plus.

#### b) RESULTATS D'ENSEMBLE CONCERNANT UNE CHAÎNE DE SOLS HYDROMORPHES DES HAUTS-PLATEAUX

Dans l'ensemble des sols hydromorphes, quel que soit l'horizon pris en considération, on retrouve des résultats analogues à ceux que nous venons d'énoncer concernant les taux de kaolinite et de gibbsite.

Les premiers maillons de la chaîne peuvent contenir de la goëthite dans des proportions généralement inférieures à celles de la gibbsite.

Les horizons organiques des sols fortement hydromorphes ont des quantités assez appréciables de gels dans la fraction minérale inférieure à 2  $\mu$ . Le rôle de ces gels est, malgré cela, secondaire car le pourcentage de la fraction minérale inférieure à 2  $\mu$  est toujours faible dans les horizons très organiques.

Cette étude minéralogique montre que, pour qu'un sol hydromorphe ait un bon complexe absorbant, il doit posséder des colloïdes organiques. Dans le cas contraire, l'argile étant kaolinitique, le complexe est obligatoirement faible. Ceci confirme les résultats chimiques qui ont été donnés relatifs à la valeur de la capacité d'échange des divers sols de la chaîne.

Des résultats analogues ont été obtenus dans les dépressions rencontrées sur la côte Est de l'Île qui est plus pluvieuse que les hauts-plateaux.

#### c) SOLS FERRALLITIQUES ENTOURANT LES DEPRESSIONS HYDROMORPHES DE LA REGION DU LAC ALAOTRA

(fig. 22)

Le sol ferrallitique présente encore de la kaolinite en quantité abondante et des teneurs en gibbsite équivalentes à celles rencontrées dans les sols hydromorphes. Il se différencie par une teneur élevée en goëthite de l'ordre du 1/5 du poids de la fraction inférieure à 2  $\mu$ .

D'autres analyses ont montré que les sols ferrallitiques pouvaient posséder de l'hématite, généralement en faible quantité.

En rapprochant ces résultats de ceux obtenus avec les sols hydromorphes, on peut dire :

que l'hydromorphie ne modifie en rien la nature des argiles ;

que le fer cristallisé dans les sols ferrallitiques est sous forme de gels dans les sols hydromorphes. (Ces formes amorphes favorisent la mise en solution ou en pseudo-solution du fer en milieu réducteur et ainsi son élimination par les eaux passant par les déversoirs des dépressions) ;

que la gibbsite conserve sensiblement le même taux dans les sols de collines et dans les alluvions se déposant en bas-fond.

#### d) DEPRESSIONS DE L'OUEST DE L'ÎLE

(fig. 23)

L'exemple montre que la fraction argileuse est composée principalement de montmorillonite (80 %) et accessoirement de kaolinite (20 %).

Des résultats analogues ont été obtenus pour des déterminations correspondant à divers horizons de sols plus ou moins hydromorphes de la région.

Ainsi, la modification de l'intensité de l'hydromorphie ne fait pas apparaître de variations nettes dans la nature de la fraction argileuse ni dans les taux de ses divers constituants.

HERVIEU a montré dans sa thèse, en 1966, qu'en sol non hydromorphe la montmorillonite existe dès que le substrat géologique devient sédimentaire, ce qui est le cas pour la majorité des terres de l'ouest de l'Île.

Lorsqu'une dépression est alluvionnée par des éléments arrachés à des terres riches en montmorillonite, elle est riche en montmorillonite.

S'il existe une genèse d'argile dans les dépressions, elle est réduite. Le matériau argileux est avant tout hérité des sols non hydromorphes.

Les horizons non organiques des dépressions de l'Ouest, riches en montmorillonite, auront une bien meilleure capacité d'échange que les mêmes horizons situés sur les hauts-plateaux.



## e) CONCLUSIONS

L'ensemble de ces résultats montre qu'au sein des dépressions malgaches, la nature des argiles reste la même, quelle que soit l'intensité de l'hydromorphie.

De plus, les argiles rencontrées dans les dépressions alluvionnées sont de même nature que celles des sols occupant les reliefs qui entourent ces dépressions et qui sont à l'origine des matériaux alluvionnés.

D'une manière schématique, les dépressions des hauts-plateaux et de la côte Est de l'île ont une fraction minérale inférieure à 2  $\mu$  comportant sous forme cristallisée : 75 % de kaolinite et 5 % de gibbsite. De plus, elle possède des minéraux amorphes (gels de fer).

La forte proportion de kaolinite laisse penser, comme l'indiquait BONIFAS en 1958, qu'il y a néosynthèse de cette argile à partir d'alumine libre et de silice contenue dans les eaux provenant des collines voisines puisque le milieu acide et gorgé d'eau est favorable à cette néosynthèse. En fait, tout se passe comme si cette néosynthèse était faible.

Dans les dépressions de l'Ouest, moins étendues que celles des hauts-plateaux, l'argile est constituée d'un mélange de montmorillonite et de kaolinite avec dominance de la montmorillonite.

## 6) ETAT DU FER

L'étude minéralogique montre que le fer se trouve rarement à l'état cristallisé dans les bas-fonds, mais se présente sous forme de gels devant favoriser sa mise en mouvement.

Pour mettre en évidence ces mouvements, nous avons effectué des mesures concernant le fer total et le fer libre, dont les résultats se résument ainsi :

Le fer total contenu dans la fraction minérale des horizons très organiques est de l'ordre de 2 à 3 %, exprimé par rapport à un poids de terre. Dans les gley sous-jacents à ces horizons très organiques, le fer est souvent encore moins abondant.

Les valeurs qui correspondent à la fraction minérale des divers horizons de sols très hydromorphes (horizons organiques et gley) sont bien plus faibles que celles des sols ferrallitiques de collines, où 10 à 15 % de fer total sont courants. Les sols peu hydromorphes ont des valeurs qui s'échelonnent entre celles des sols ferrallitiques et celles des sols très hydromorphes.

Signalons que les débris organiques des sols tourbeux ont des valeurs en fer très inférieures à celles correspondant à la fraction minérale de ces mêmes sols. Il n'y a, en effet, que quelques centigrammes de fer dans 100 g de matière sèche, composée de débris organiques.

Ainsi, le fer contenu dans l'ensemble de la fraction minérale et de la fraction organique est d'autant plus faible que la fraction organique est importante.

Le fer libre dosé sur la fraction minérale donne des résultats à peine plus faibles que le fer total. Cela est dû à la méthode utilisée (méthode DEB) qui extrait de ces sols la majorité du fer, puisque celui-ci n'est pas intégré aux silicates.

Les sols marmorisés possèdent environ 7 % de fer libre, exprimé par rapport à un poids et les sols très hydromorphes 1 à 2 %.

Des tests rapides destinés à mettre en évidence la présence de fer ferreux montrent que, dès que la nappe phréatique gorge un horizon, le fer passe en solution et peut être entraîné par les eaux lorsqu'elles ont un déplacement oblique.

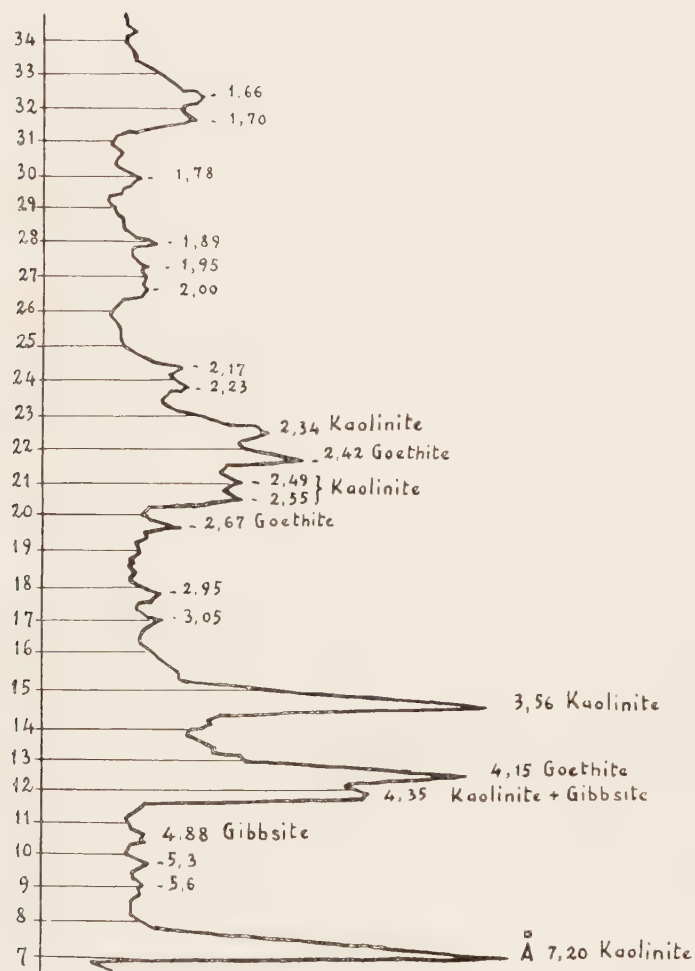
Frappé par la présence, dans les eaux de drainage des sols hydromorphes, de produits d'aspect gélatineux de couleur brun rouille, on a, en saison sèche sur le fond d'un canal atteignant la base des horizons organiques d'un sol « semi-tourbeux », prélevé ce produit à l'aide d'une spatule. Il présente 15 % de matières organiques totales, 4 % de fer libre et comporte une fraction importante d'argile provenant partiellement du fond du canal de nature argileuse. Autrement dit, le produit pur est bien plus riche en matière organique et en fer.

Les complexes fer et matières organiques auxquels s'ajoute de l'argile constituent donc une forme de migration du fer.

Etant donné que pendant la saison des pluies les eaux de drainage sont caractérisées par cette couleur brun rouille, les formes pseudosolubles doivent être considérées comme un moyen actif d'entraînement oblique du fer.

## SOL FERRALLITIQUE DE COLLINES

## Rayons X

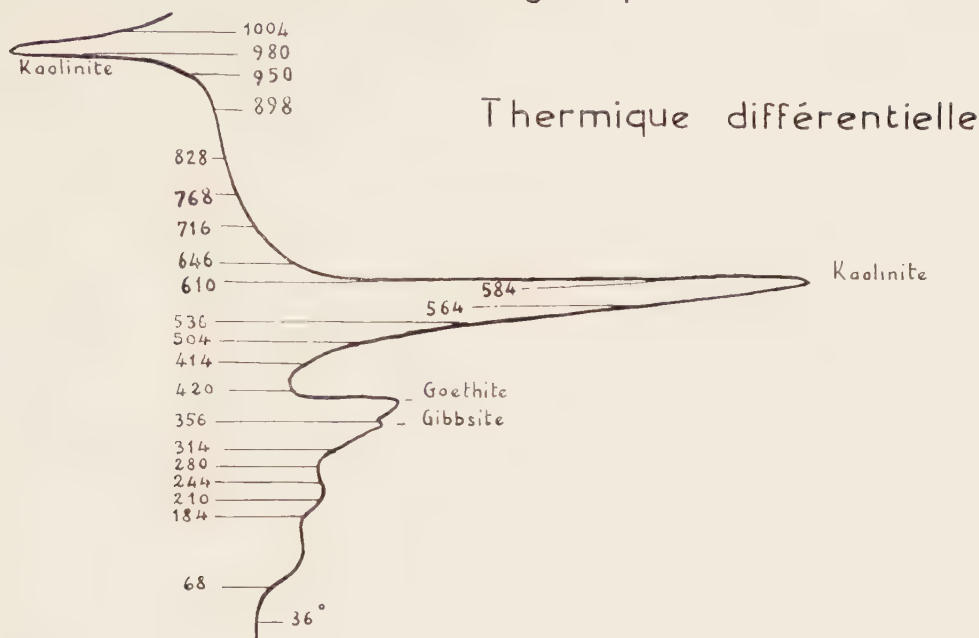


$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $2 \times 3 \times 2$   
 $3 \text{ m}/10$   
 Anticathode Co



$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $0.75 \times 1.75 \times 2$   
 $5 \text{ m}/10$   
 Anticathode Co

horizon sous-jacent à l'horizon organique



## Thermobalance

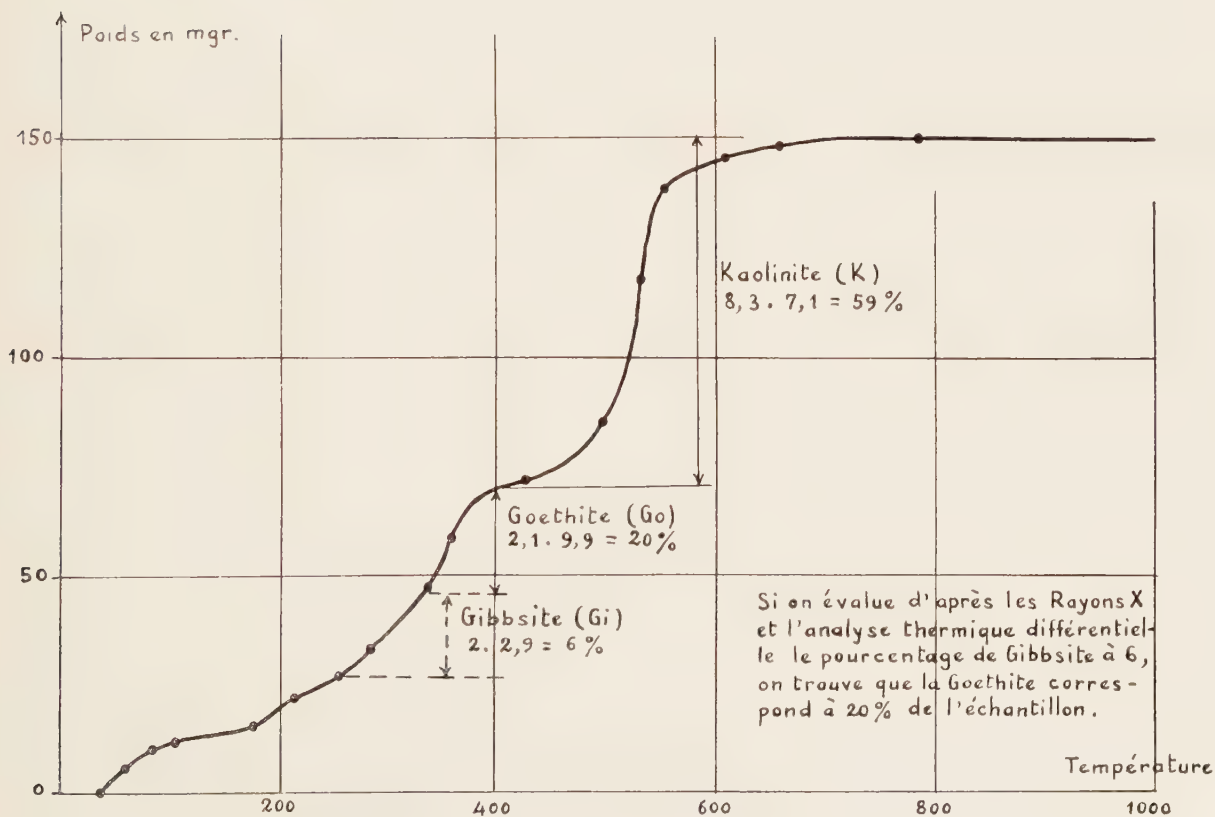
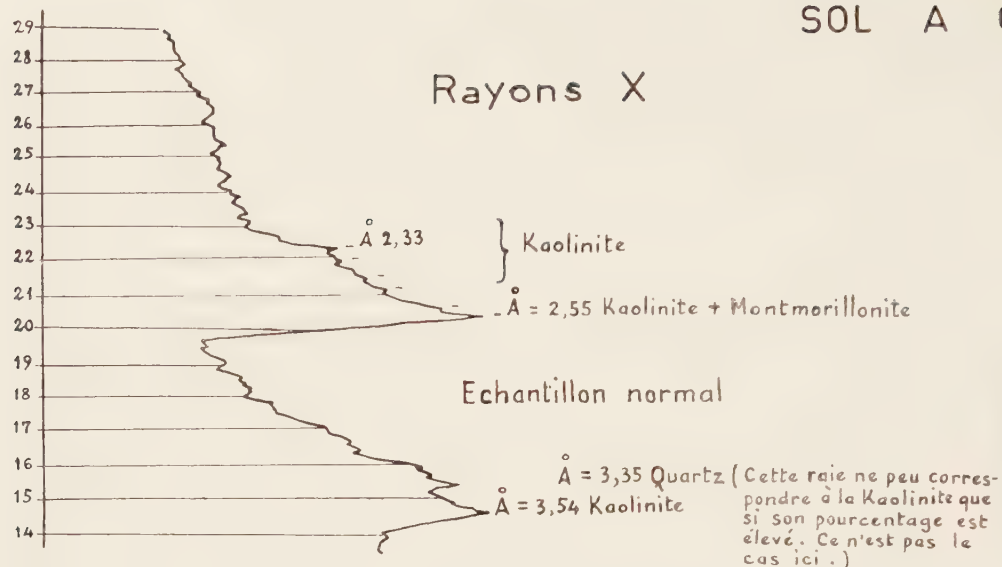


Figure 22

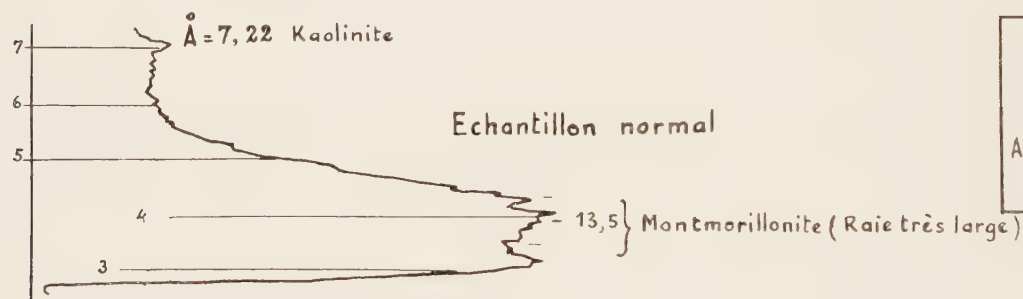
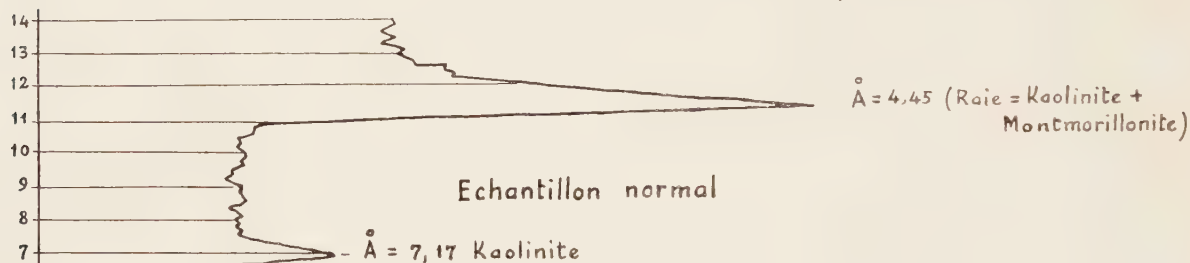


## SOL A GLEY REDUIT

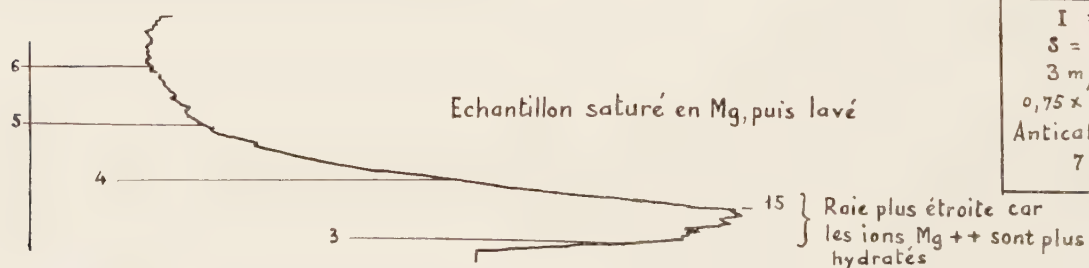
## Rayons X



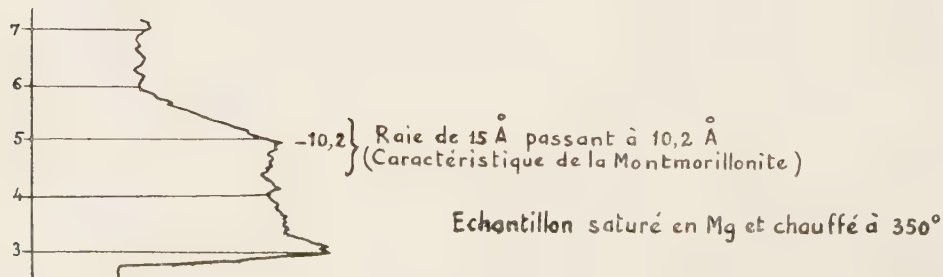
$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $2 \times 3 \times 2$   
 $3m/10$   
 Anticathode Co  
 $7^\circ 1$



$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $0,75 \times 1,75 \times 2$   
 $3m/10$   
 Anticathode Co  
 $7^\circ 1$



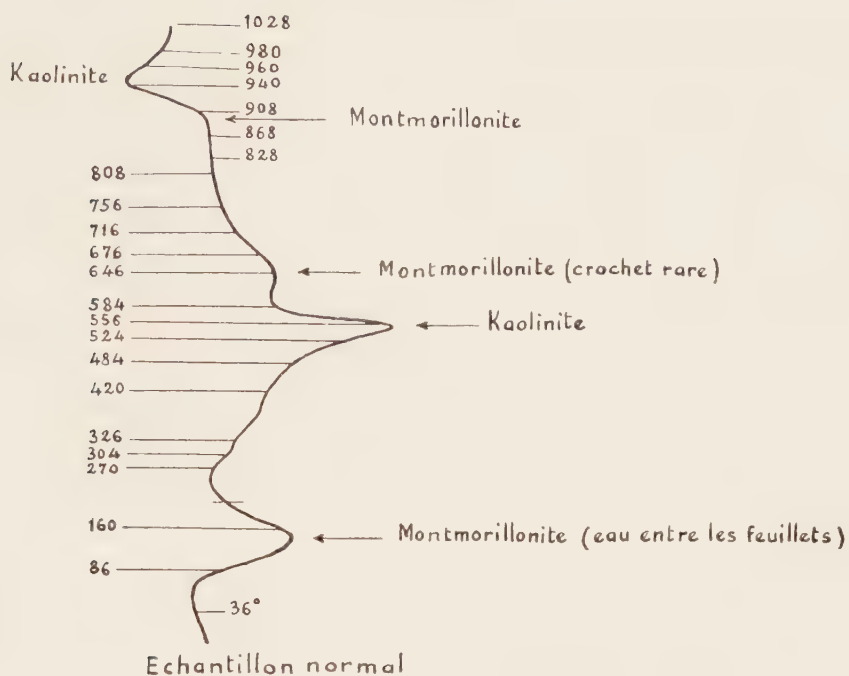
$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $3m/10$   
 $0,75 \times 1,75 \times 2$   
 Anticathode Co  
 $7^\circ 1$



$I = 20$   
 $S = 20/2$   
 $0,75 \times 1,75 \times 2$   
 $5m/10$   
 Anticathode Co  
 $7^\circ 1$

izon de gley

## Thermique différentielle



## Thermobalance

Poids en mgr

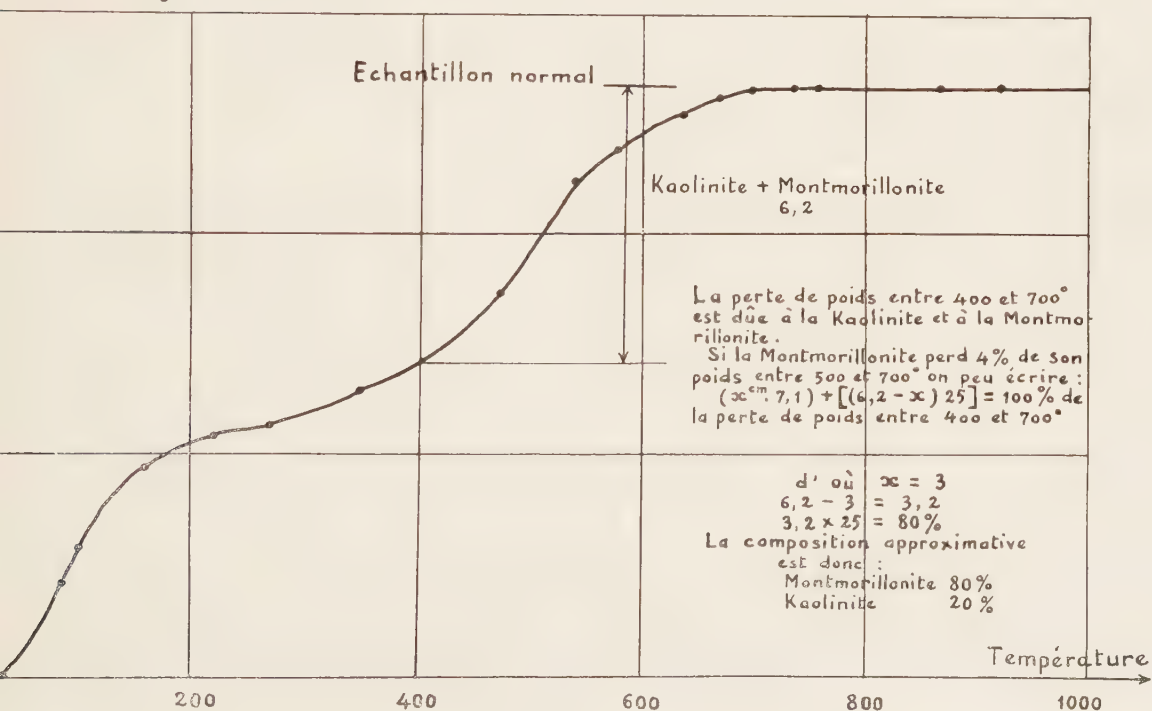


Figure 23

**En résumé,** la goethite, qui forme généralement un film autour des particules terreuses des sols de collines, est à l'origine des gels de fer rencontrés dans les dépressions. Le fer des dépressions, placé dans un milieu réducteur et mis en contact avec des matières organiques colloïdales, passe sous forme réduite ou crée des complexes pseudosolubles de couleur brun rouille. L'écoulement oblique de l'eau dans les profils, puis son échappement par les déversoirs, provoquent une disparition progressive du fer en bas-fond.

## 7) RAPPORT SILICE/ALUMINE

Ce rapport a été mesuré sur la fraction minérale des échantillons.

Les résultats obtenus montrent que, dans les sols hydromorphes, le rapport est toujours nettement inférieur à 2. Rappelons que dans les sols ferrallitiques de collines il est inférieur à 2 dans la partie supérieure du profil et approche ou dépasse 2 au voisinage de la roche-mère.

L'hydromorphie a une action s'exerçant dans le sens de la diminution de ce rapport qui atteint 1. La silice est entraînée par les eaux et l'alumine reste sur place.

Des dosages d'aluminium total montrent que l'aluminium est aussi abondant dans la fraction minérale des sols hydromorphes que dans les sols ferrallitiques de collines. Ceci est confirmé par l'analyse minéralogique de la fraction fine.

Les débris organiques sont encore moins riches en alumine qu'en fer, si bien que plus le sol en possède moins l'alumine est abondante dans l'échantillon global.

Des dosages d'aluminium échangeable suivant la méthode JACKSON donnent des résultats faibles pour l'ensemble des sols de la chaîne.

**En résumé,** l'aluminium apparaît comme ayant une faible mobilité comparée à celle du fer. L'aluminium arrive dans les alluvions au moment de la constitution des horizons minéraux des sols hydromorphes puis conserve des taux sensiblement égaux.

## III) CONCLUSIONS RELATIVES AU PREMIER CHAPITRE ET CLASSIFICATION PEDOLOGIQUE DES SOLS ETUDIES

Dans ce chapitre, nous avons étudié les profils typiques rencontrés dans les dépressions soumises à l'hydromorphie, dans le but de les caractériser par leur morphologie, leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques.

Les résultats obtenus peuvent se résumer ainsi :

### 1) MORPHOLOGIE

La chaîne de sol correspondant à une dépression soumise à un régime d'ennoyage constant d'une année à l'autre se compose des cinq profils essentiels :

#### α) SOL MARMORISE

L'action de l'hydromorphie est faible et ne s'exerce que dans les horizons profonds.

#### β) SOL A PSEUDOGLEY

La phase d'engorgement par l'eau de la base du profil est plus longue au cours de l'année et crée un horizon tacheté.

#### γ) SOL A GLEY REDUIT

En profondeur se forme un gley, gorgé d'eau durant toute l'année.

#### δ) SOL SEMI-TOUBEUX

Le gley existe encore et, de plus, une accumulation des matières organiques s'amorce en surface, consécutive à un ennoyage assez prolongé de l'ensemble du profil.

#### ε) SOL TOURBEUX

L'accumulation des matières organiques a plus d'ampleur.



## 2) CARACTERES ANALYTIQUES

### α) TEXTURES

La granulométrie des sols peu hydromorphes est très changeante avec la profondeur et les variations sont anarchiques. Toutefois, d'une manière générale, les limons sont abondants et les sables bien représentés.

Pour les sols très hydromorphes, la fraction limoneuse reste dominante mais l'argile acquiert de l'importance. De plus, les textures varient plus progressivement vers la profondeur. Les horizons les plus éloignés de la surface sont généralement sableux.

### β) DENSITES APPARENTES

Les variations de densité apparente provoquées par l'action de l'hydromorphie sont considérables. Les chiffres extrêmes obtenus sont : 1,2 dans les horizons peu hydromorphes et 0,2 dans les horizons fibreux des sols tourbeux.

Ceci impose, lorsque l'on veut évaluer le potentiel de production agricole d'un sol, d'exprimer les résultats analytiques non pas, suivant l'usage courant, en fonction d'une unité de poids mais en fonction d'une unité de volume du sol.

### γ) ELEMENTS ORGANIQUES

L'expression des résultats par rapport à une unité de volume montre que, lorsque le degré d'hydromorphie n'est pas excessif, qu'il est situé entre celui des « sols à gley » et des « sols semi-tourbeux », les terres présentent en surface les meilleures teneurs en matières organiques totales, en azote total, en humus. Ces mêmes terres donnent les taux d'humification les plus élevés.

### δ) COMPLEXE ABSORBANT

Par rapport à un volume de sol en place, c'est encore pour un degré d'hydromorphie non excessif que nous trouvons en surface des sols un complexe absorbant ayant les meilleures capacités d'échange totales. A ce stade, le degré de saturation est moyen.

### ε) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

L'acidité des terres et leur pouvoir tampon s'accroît avec le degré d'hydromorphie. La variation de l'acidité est de l'ordre d'une unité pH.

### ζ) MINERALOGIE DE LA FRACTION ARGILEUSE

L'hydromorphie ne modifie pas la nature des argiles contenues dans les alluvions se déposant en bas-fond. Sur les hauts-plateaux, l'argile est kaolinitique.

### η) FER

Entraîné sous forme soluble ou pseudosoluble, par les eaux qui se déplacent obliquement dans le profil, le fer diminue à mesure que l'hydromorphie s'accroît.

### θ) RAPPORT SILICE/ALUMINE

Ce rapport, déjà inférieur à 2 dans les horizons supérieurs des sols ferrallitiques de collines, a tendance à s'abaisser avec l'hydromorphie.

## 3) CONCLUSIONS

L'ensemble des résultats morphologiques et analytiques obtenus dans les dépressions montre que l'hydromorphie exerce des actions profondes sur les terres.

Lorsque son intensité est moyennement poussée, les sols présentent des caractères analytiques favorables à de bonnes aptitudes culturales.

Le premier chapitre de cette étude a fait connaître le « sol tourbeux » qui possède une large extension géographique et dont l'évolution par drainage fera l'objet du chapitre suivant.

Cette évolution sera abordée, après avoir placé les divers sols de la chaîne étudiée, dans les classifications pédologiques.

## 4) CLASSIFICATION PEDOLOGIQUE

Pour placer chacun des cinq profils décrits dans les principales classifications pédologiques, utilisons un tableau constitué de cinq colonnes verticales, définies chacune par les noms donnés aux profils.

Dans ces colonnes portons les classes, ordres, groupes et sous-groupes, auxquels chaque profil appartient.

|               |                  |            |                   |              |
|---------------|------------------|------------|-------------------|--------------|
| Sol marmorise | Sol à pseudogley | Sol à gley | Sol semi-tourbeux | Sol tourbeux |
|---------------|------------------|------------|-------------------|--------------|

|                                                                                                                         |                                                                                                    |                                                                                                   |                                                                                                       |                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| CLASSIFICATION FRANÇAISE                                                                                                |                                                                                                    |                                                                                                   |                                                                                                       |                                           |
| présentée à Gand en 1962, établie sur des bases génétiques (précis de Pédologie de DUCHAUFOR, chez Masson, Paris, 1965) |                                                                                                    |                                                                                                   |                                                                                                       |                                           |
| CLASSE II :<br>Sols à profils peu différenciés (pauvres en calcium).                                                    | CLASSE X<br>Sols hydromorphes                                                                      |                                                                                                   |                                                                                                       |                                           |
| Sous-classe 1 :<br>Sols à profil A.C. d'origine non climatique.                                                         | Sous-classe 1 :<br>Sols hydromorphes minéraux à réduction partielle du fer, à profils A.g. ou A.G. | Sous-classe 2 :<br>Sols hydromorphes semi-tourbeux et à réduction partielle du fer, à profil A.G. | Sous-classe 3 :<br>Sols hydromorphes organiques, tourbeux.                                            |                                           |
| Grand groupe b :<br>Sols alluviaux.                                                                                     | Grand groupe b :<br>Sols à pseudogley de profondeur.                                               | Grand groupe c :<br>Sols à gley.                                                                  | Grand groupe a :<br>Sols à Anmor acide (mélange intime de matières organiques humifiées et d'argile). | Grand groupe b :<br>Tourbes oligotrophes. |
| Sous-groupe :<br>Sols à hydromorphie.                                                                                   |                                                                                                    |                                                                                                   |                                                                                                       |                                           |

|                                                                                  |                                                                 |                                                             |                                                      |                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| CLASSIFICATION DES SOLS                                                          |                                                                 |                                                             |                                                      |                                              |
| par AUBERT, Cahiers de Pédologie de l'ORSTOM, vol. III, fasc. 3, 1965, p. 269-88 |                                                                 |                                                             |                                                      |                                              |
| CLASSE II :<br>Sols peu évolués.                                                 | CLASSE X<br>Sols hydromorphes                                   |                                                             |                                                      |                                              |
| Sous-classe 2 :<br>Sols peu évolués d'origine non climatique.                    | Sous-classe 3 :<br>Sols hydromorphes minéraux ou peu humifères. | Sous-classe 2 :<br>Sols hydromorphes moyennement organiques | Sous-classe 1 :<br>Sols hydromorphes organiques.     |                                              |
| Groupe b :<br>Sols peu évolués d'apport.                                         | Groupe b :<br>Sols hydromorphes peu humifères à pseudogley.     | Groupe a :<br>Sols hydromorphes peu humifères à gley.       | Groupe :<br>Sols humiques à gley.                    | Groupe :<br>Sols tourbeux.                   |
| Sous-groupe :<br>Hydromorphes.                                                   | Sous-groupe :<br>Sols à taches et concrétions.                  | Sous-groupe :<br>Sols à gley de profondeur.                 | Sous-groupe :<br>Sols humiques à gley à anmor acide. | Sous-groupe :<br>Sols tourbeux oligotrophes. |

|                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      |                                                             |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--|
| CLASSIFICATION AMÉRICAINE                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      |                                                             |  |
| présentée à Madison en 1960, établie sur des caractères mesurables d'ordre morphologique et physico-chimique traduisant une parentée génétique (septième approximation et additifs) |                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                      |                                                             |  |
| ORDRE 1 :<br>Entisols.<br>Ce sont des sols très peu évolués dépourvus d'horizon de diagnostic caractérisé. (Les lettres ENT suffisent à les désigner dans les unités secondaires.)  | ORDRE 3 :<br>Inceptisols.<br>Ce sont des sols à horizon de diagnostic à formation rapide. Présence d'un Epipédon Umbrique. L'horizon de surface est constitué d'un Anmor acide. (Les lettres EPT suffisent à le désigner dans les unités secondaires.) | ORDRE 10 :<br>Histisols.<br>Sols hydromorphes organiques tourbeux, caractérisés par un horizon de surface constitué de matière organique grossière, appelé Histique. |                                                             |  |
| Sous-ordre :<br>FLUVENTS<br>Ce sont des dépôts fluviaux.                                                                                                                            | Sous-ordre :<br>AQUEPTS<br>Ce sont des sols hydromorphes alluviaux à pseudogley caractérisés par les lettres AQU.                                                                                                                                      | Sous-ordre :<br>AQUEPTS                                                                                                                                              | Sous-ordre :<br>FIBRIST<br>Structure fibreuse.              |  |
|                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                        | Grand groupe :<br>HYDRAQUEPT<br>Pas d'horizon de surface histique.                                                                                                   | Grand groupe :<br>HUMAQUEPT<br>Horizon de surface histique. |  |

|                                                            |                                                                  |                                   |                                           |  |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------|--|
| CLASSIFICATION SYNTHÉTIQUE                                 |                                                                  |                                   |                                           |  |
| de MUCKENHAUSEN de 1954, basée sur les processus évolutifs |                                                                  |                                   |                                           |  |
| Forte oscillation de nappe : sols alluviaux.               | Oscillation moyenne de la nappe : sols alluviaux à gley profond. | Faible oscillation : sols à gley. | Oscillation presque nulle : sol tourbeux. |  |

|                                                                            |                                                                                                          |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|--|
| ANCIENNE CLASSIFICATION CLIMATIQUE                                         |                                                                                                          |  |  |  |
| Sols azonaux : sols d'alluvions récentes.                                  | Sols intrazonaux, hydromorphiques.                                                                       |  |  |  |
| Tendance zonale puisque soumis à un climat entraînant la ferrallitisation. | Ils ont une évolution différente de l'ensemble de la zone climatique, qui donne des sols ferrallitiques. |  |  |  |

L'examen de ce tableau montre que les sols hydromorphes malgaches trouvent bien leur place dans les diverses classifications internationales.

Les méthodes françaises présentent l'avantage de faire apparaître d'entrée une proche parenté entre les profils étudiés, puisqu'elles en placent quatre sur cinq dans une « Classe » unique appelée « hydromorphes ». Cette « Classe » souligne l'existence d'un phénomène pédogénétique commun, dont l'influence sur les caractères morphologiques et physico-chimiques des terres est capitale. C'est ensuite l'intensité du phénomène qui répartit les sols étudiés dans les « Sous-Classes ».

La classification américaine, par contre, ventile des sols très voisins dans divers « Ordres » qui correspondent aux « Classes » des Auteurs français. Ceci ne traduit pas une solution de continuité sous l'action d'un même phénomène pédogénétique.

L'étude des nombreuses dépressions malgaches, qui occupent de larges superficies, motive le maintien de la « Classe des sols hydromorphes » et pousse même à vouloir intégrer dans cette « Classe » les « sols marmorisés » qui, bien que ne présentant que des caractères secondaires d'hydromorphie, constituent déjà le premier maillon de la chaîne.

Après l'examen des influences de l'hydromorphie dans les dépressions possédant un niveau d'engorgement semblable à lui-même au cours des ans, nous allons voir quels bouleversements l'homme peut entraîner dans les sols à accumulation de matières organiques, en les drainant pour étendre la riziculture.



## CHAPITRE II

# CONSEQUENCES D'ORDRE PEDOLOGIQUE, RELATIVES AU DRAINAGE DES DEPRESSIONS, EN PRENANT POUR EXEMPLE DE SOL LE PLUS HYDROMORPHE DE LA CHAÎNE

Rappelons qu'au cours de l'évolution par drainage d'un sol tourbeux, compte tenu des techniques culturales adoptées, les végétaux recouvrant le sol et le sol lui-même brûlent. Ces incendies partent des rizières entourant le marais tourbeux, sur lesquelles les mauvaises herbes et les pailles sont détruites par calcination. Donc, à Madagascar, aucune évolution de tourbe soumise au drainage ne se fait sans incendie.

En conséquence, un premier sous-chapitre traitera de l'évolution qui se réalise à longue échéance, en enregistrant les actions cumulées du drainage et du feu sur des terres dont le dernier brûlage date d'au moins deux années. Ainsi, seules les marques pérennes du feu seront prises en considération.

Dans un deuxième sous-chapitre, seront étudiés les effets immédiats du feu qui, bien que particulièrement marqués au début du drainage sur sols très organiques, ne sont pas pour autant négligeables lorsque le drainage est plus ancien, à la condition que la végétation soit dense et les incendies répétés dans le temps.

## EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE PAR ACTION COMBINEE DU DRAINAGE ET DU FEU

Pour mettre en évidence de manière simple cette évolution, il sera tenu compte :

- du stade de départ tourbeux (Stade I),
- d'un stade intermédiaire (Stade II),
- d'une tourbe très évoluée (Stade III).

Le stade intermédiaire correspond à un sol tourbeux drainé pour lequel l'action du feu, jusque-là très brutale, se ralentit. A ce stade, les taux de matières organiques de la surface du profil réduits par les oxydations vives (incendies) et, accessoirement par les destructions d'ordre microbien, ne sont plus assez élevés pour alimenter des incendies grandioses.

Le stade très évolué correspond à une stabilisation relative de la nature du sol. Les taux de matières organiques se maintiennent en effet sensiblement égaux à eux-mêmes d'une année à l'autre, alors qu'entre ce stade et le précédent l'extension progressive du régime aérobie favorisait l'oxydation par voie microbienne des matières organiques ayant échappé aux feux.

Un équilibre a tendance à se créer entre le stock organique restant et le régime de l'hydromorphie, défini par la riziculture qui provoque, cinq mois par an, l'engorgement de la surface du sol.

L'équilibre n'étant pas absolu, la diminution des matières organiques se poursuit et le sol ayant atteint une évolution ultime perd ses aptitudes culturales.

Dans un troisième chapitre, nous signalerons que la régénération des sols ayant atteint le stade ultime de l'évolution est onéreuse et difficile mais qu'il est possible d'éviter d'y aboutir.

Le sous-chapitre qui va être abordé est ainsi composé :

- Paragraphe I : Morphologie des principaux stades évolutifs d'un profil tourbeux drainé.
- Paragraphe II : Caractères analytiques des stades dont la description morphologique vient d'être donnée.
- Paragraphe III : Conclusion relative à ce sous-chapitre.

## 1) MORPHOLOGIE DES PRINCIPAUX STADES EVOLUTIFS DU PROFIL TOURBEUX

Dans ce paragraphe, après avoir décrit les profils, nous soulignerons l'importance des tassements et leurs conséquences sur la mise en valeur des terres.

### A) DESCRIPTION DES PROFILS

Un schéma résume les caractères morphologiques essentiels des trois stades pris en considération (fig. 24).

Il indique successivement :

- le type de végétation naturelle et éventuellement la culture entreprise ;
- la durée, en mois, de l'engorgement de la surface du sol, au cours de l'année (durée exprimée par un chiffre placé au-dessus du croquis relatif à chaque stade évolutif) ;
- les niveaux extrêmes de battement du toit de la nappe (symbolisés par des flèches) ;
- l'état de démantèlement des débris organiques dans chaque horizon, figuré par des traits plus ou moins épais et plus ou moins courts ;
- le stade évolutif où se trouve le sol tourbeux (stades I, II et III) ;
- une succession de lettres correspondant à la désignation des profils suivant la nomenclature internationale.

Nous allons étudier les stades II et III, sans revenir dans le détail sur le stade I (fig. 25) qui a été décrit dans le chapitre I.

#### 1) STADE II

La végétation se compose surtout de *Cyperus latifolius* (fig. 26). Quelques *Cyperus emyrensis* subsistent, mais sont de petite taille. Cette végétation naturelle fait place, très généralement, à des cultures de riz qui peuvent déjà se pratiquer à l'aide de machines agricoles, alors qu'avant ce stade le sol est trop noyé et trop mou pour supporter le poids d'un tracteur, même équipé de larges chenilles.

Le profil est le suivant :

0 à 20 cm :

Horizon gris très foncé (J 10), riche en matière organique constituée surtout de fins débris végétaux\*.

Ces fins débris proviennent principalement de la décomposition des débris de racines que l'on trouve, au stade I, au-dessous des racines grossières. Le régime, plus aérobie, permet ici une meilleure oxydation des matières organiques par voie microbienne. Ce sont les débris de racines et rarement les racines elles-mêmes qui donnent naissance à cet horizon, car les feux consomment les horizons de racines grossières et les cendres produites sont éliminées obliquement par érosion.

Que le sol porte sa végétation naturelle ou des cultures de riz, l'horizon supérieur est riche en racines fonctionnelles.

Dès que les racines meurent, elles s'altèrent rapidement et se désagrègent. Il en résulte que l'horizon a peu l'aspect fibreux et qu'il est assez plastique et collant.

Ces caractères sont favorisés par des taux importants de limon et d'argile.

Le sol n'étant plus gorgé d'eau pendant l'ensemble de l'année, des taches jaune-rouille peuvent apparaître. Elles sont peu visibles, car elles sont dues au fer et que celui-ci a été activement éliminé obliquement par les eaux. Lorsque le sol est soumis à une dessiccation très forte et prolongée, des agrégats durs se forment. Ils sont polyédriques, ont 3 à 5 mm de côté et possèdent des faces luisantes. Leur réhumectation est particulièrement difficile.

\* Les correspondances entre les couleurs prises au code CAILLEUX-TAYLOR et au code MUNSELL sont données dans la description de la chaîne de sols, au chapitre I.

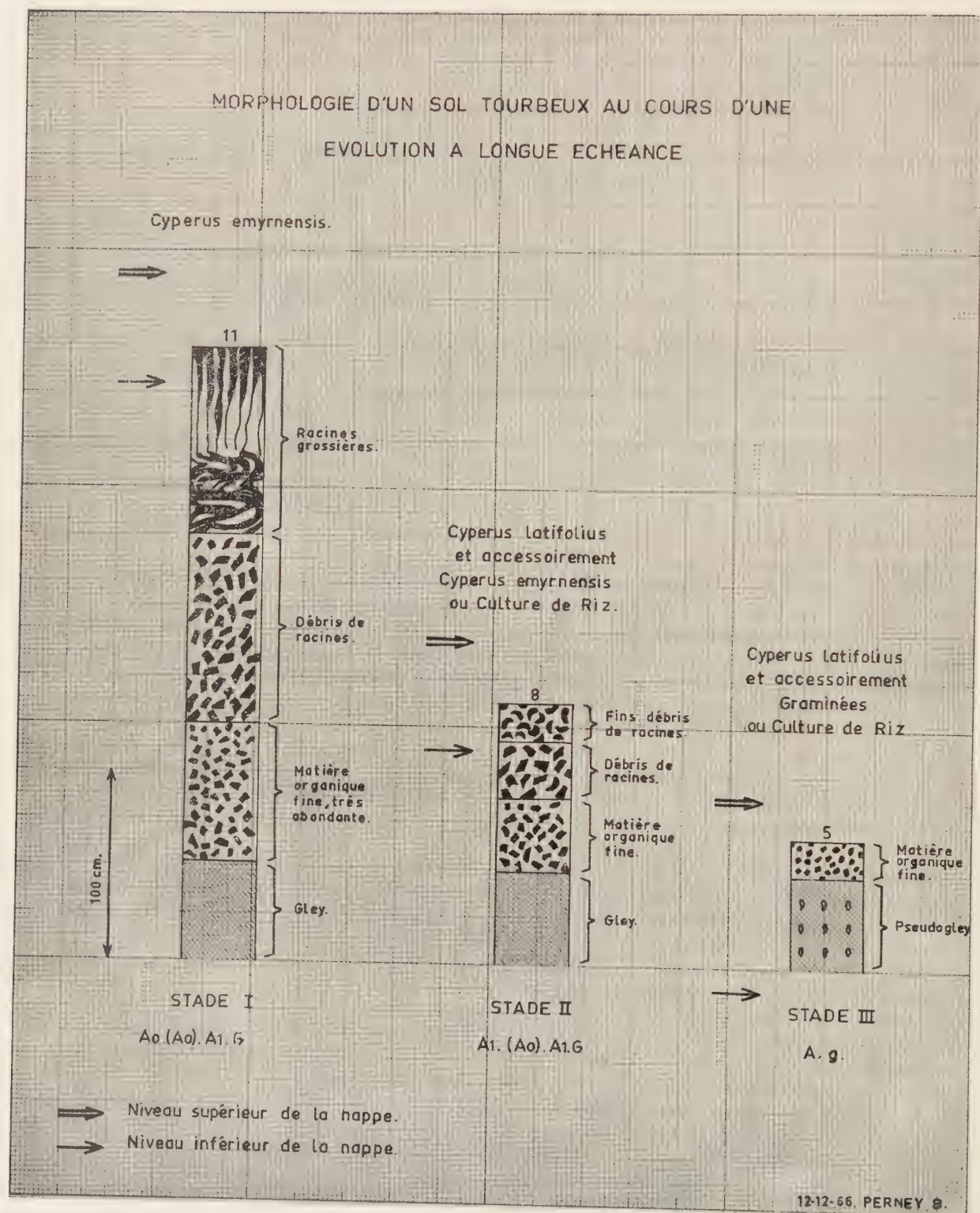


Figure 24



Fig. 25 et 26

DRAINAGE DES TOURBES

(Lac Alaotra)



Fig. 25. — Premier passage de drague dans le marais pour constituer un drain (stade I).



Fig. 26. — Tourbe au stade II couverte de *Cyperus latifolius*.

20 à 50 cm :

Horizon formé de débris organiques fragmentés, ramollis.

C'est un vestige de l'horizon de débris de racines du stade I.

Lorsque les feux ont été particulièrement actifs, cet horizon peut ne pas subsister.

De plus, au bout d'un certain temps, les débris s'altèrent sous les actions microbiennes et l'horizon qu'ils constituaient se confond avec les voisins.

50 à 90 cm :

Horizon possédant un mélange intime de matière organique fine, de limon et d'argile.

C'est le même horizon que celui que l'on rencontre sur le gley au stade I.

90 cm et plus :

Gley réduit, gris clair à l'état humide (B 90), massif, compact, plastique.

L'hydromorphie reste permanente, dans ce profil, sauf dans l'horizon de surface qui subit au cours de l'année une phase anaérobie prolongée et une phase aérobie de quatre mois.

A l'exception de l'horizon de surface, ce profil n'est autre qu'un profil tourbeux non évolué, décapé et amorçant un tassement de ses horizons organiques. Ces analogies entre les stades I et II ne doivent pas faire perdre de vue que c'est avant tout l'horizon de surface qui définit la valeur culturale du sol.

Dans les terres au stade II, la récolte de riz se réalise dans l'eau, puisque le cycle végétatif est de cinq mois et que les semis ont lieu au début de l'ennoyage de la surface du sol.

Le profil est du type : A 1. (Ao). A 1. Gr., alors qu'au stade I nous avons : Ao. (Ao). A 1. Gr.

Rappelons que :

A 1 correspond à un horizon dans lequel la matière organique abondante et fine est mélangée à la fraction minérale ;

(Ao) à un horizon de débris organiques ;

Gr au gley réduit ;

Ao à un horizon fibreux.

## 2) STADE III

La végétation, avec un engorgement par l'eau de la surface du sol d'environ cinq mois par an, se compose de *Cyperus latifolius* et de quelques Graminées (*Cynodon* et *Digitaria*).

Lorsque la durée de l'engorgement baisse, les Graminées se mettent à dominer.

Avec la riziculture (fig. 27 et 27 bis), le terrain est noyé pendant une période précise de cinq mois par an, réglée par irrigation.

Les eaux d'ennoyage du profil, mal filtrées par la végétation naturelle ou les cultures de riz, provoquent en surface du sol un dépôt rouge-jaune (F 36), d'aspect analogue à celui des alluvions constituant les premiers profils de la chaîne des sols hydromorphes étudiés dans le chapitre I.

Ce dépôt généralement peu épais, environ 1 cm par an, qui présente une texture limono-argileuse, exerce une action non négligeable sur les caractères de l'horizon de labour des rizières. C'est pour cette raison que, chaque fois que ce sera nécessaire, on donnera les valeurs analytiques de ces apports récents que l'on appellera « alluvions fluviales » (fig. 28 et 28 bis).

Signalons qu'au stade II ces « alluvions fluviales » sont moins abondantes et jouent en conséquence un faible rôle sur la nature de la surface du profil.

Le profil, au stade III, a l'aspect suivant :

0 à 20 cm :

Horizon présentant à l'état humide une couleur gris très foncé (J 90). En séchant, le ton s'éclaircit et des taches jaune-rouille sont parfois visibles.

A l'état humide, l'horizon est plastique et imperméable. Il possède une matière organique fine, mélangée au limon et à l'argile. Les débris organiques s'y désagrègent très vite.

Fig. 27 et 27 bis

## TOURBE AU STADE III CULTIVEE EN RIZ

(Bordure ouest du Lac Alaotra)

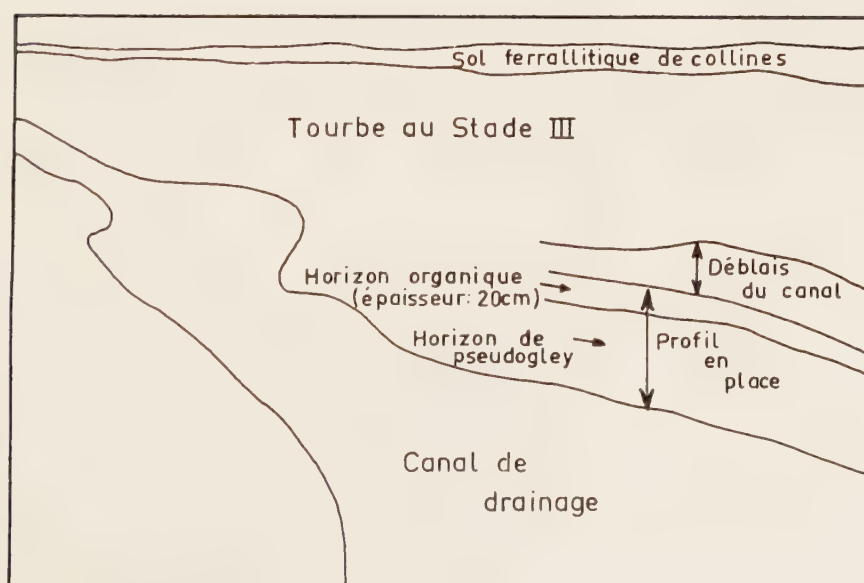
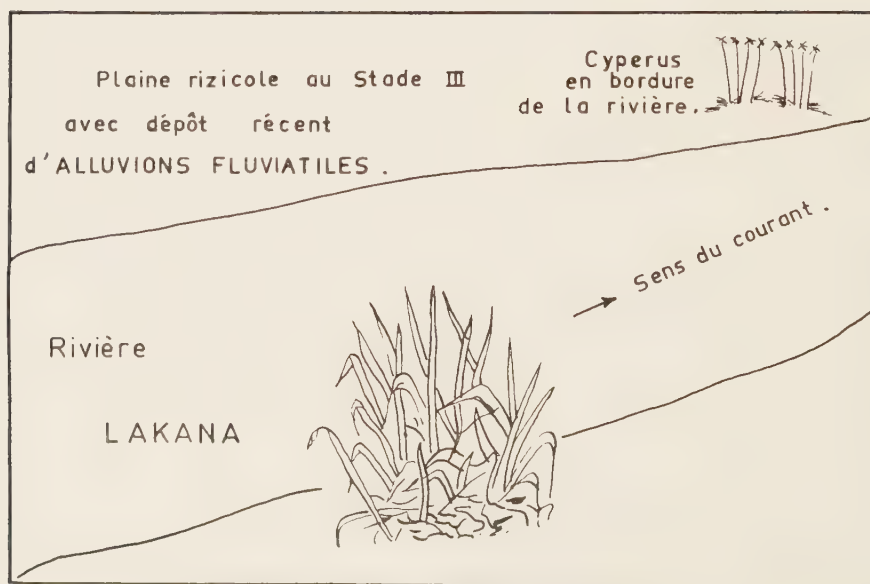




Fig. 28 et 28 bis

ALLUVIONNEMENT SUR SOL AU STADE III

(Lac Alaotra)



Déshydraté, il se craquelle. Les fentes de retrait ont 2 à 3 cm de largeur. Elles pénètrent l'ensemble de l'horizon et parfois le sous-jacent. Ces terres n'ont pas pour cela des caractères vertiques.

La structure, en saison sèche, est nuciforme ou polyédrique. Les agrégats ont une forte cohésion.

20 cm et plus :

Horizon gris clair très compact, massif à l'état humide. Il porte des taches jaune-rouille, visibles le long des racines verticales en cours de désagrégation qui créent une porosité tubulaire. Le fer donnant ces colorations provient en partie des dépôts alluviaux récents qui se réalisent en surface du sol.

Les taches témoignent de la transformation du gley en pseudogley.

Dans ce profil, l'horizon organique correspond à ce qui reste des trois horizons organiques du stade II. Les labours contribuent à l'homogénéiser. La transition avec le pseudogley reste brutale.

Le profil est du type : A. Go ou A.g.

A représente l'horizon organique ;

Go le gley oxydé ;

g le pseudogley.

## B) NOTION DE TASSEMENT ET CONSEQUENCES SUR LA MISE EN VALEUR DES TERRES

L'étude morphologique de l'évolution d'une tourbe par drainage montre que la surface du sol s'abaisse considérablement. Les modifications de cote topographique sont de l'ordre de 3 m dans les cas courants et de plus de 10 m dans les cas extrêmes.

Au cours de l'évolution, la cote topographique de la surface de l'horizon de gley, non organique, reste pratiquement constante.

Le tassement a les conséquences graves suivantes sur la mise en valeur des tourbes par drainage :

### a) Prix élevé du réseau de drainage.

Un drain, creusé à la drague dans les horizons organiques du sol au stade I, disparaît à mesure que le sol l'entourant se tasse. Il convient donc de reprendre plusieurs fois un même drain qui ne devient définitif que lorsqu'il a atteint 1 m de profondeur dans le gley.

### b) Modification de la topographie du périmètre drainé.

La surface d'un sol tourbeux non drainé est pratiquement plane. Elle ne possède en effet qu'une faible pente régulière allant de la bordure vers le centre de la dépression. Dès le début du drainage, un relief ondulé apparaît.

En fonction de leur position géographique, les profils tourbeux sont plus ou moins épais. Cette variation d'épaisseur compense les reliefs que présente la surface de l'horizon stable de gley. Autrement dit, les horizons organiques cachent le relief des horizons minéraux.

Le drainage poussé des tourbes, qui conduit, à la longue, à un profil du type stade III (20 cm d'horizon organique reposant sur un gley oxydé), fait donc apparaître un relief qui peut être nettement accidenté.

Il convient, en conséquence, avant de tracer le réseau de drainage, de connaître la topographie d'avenir pour orienter les canaux.

Pour définir cette topographie, il suffit, dans les tourbes au stade I, d'enfoncer un pieu verticalement. Il pénètre sans difficulté les horizons organiques, puis s'arrête lorsqu'il rencontre le gley. Connaissant la cote topographique de la surface de la tourbe et l'épaisseur de la tourbe, la cote de la surface du gley est facilement déduite.

Plus la topographie d'une tourbe drainée est complexe, plus le prix d'aménagement d'un hectare de rizières planées est onéreux.

### c) Nécessité de prévoir, sur le sol en cours de tassement et cultivé, des vannes d'irrigation pouvant être abaissées en fonction des variations de cotes topographiques.

Nous reviendrons sur cette notion de tassement au cours du sous-chapitre concernant l'« évolution à brève échéance par action immédiate d'un brûlage ».

## C) RESUME DES CONSEQUENCES DU DRAINAGE SUR LA MORPHOLOGIE DES TOURBES

Le drainage entraîne :

- une diminution considérable de l'épaisseur des horizons organiques ;
- la disparition des structures fibreuses ;
- une augmentation relative de la fraction minérale, constituée de limon et d'argile, consécutive à l'oxydation des éléments organiques.

De plus, quand le sol tourbeux perd sa végétation de Cypéracées, il reçoit en surface des dépôts d'alluvions fines récentes peu volumineux, mais susceptibles d'influencer ses caractères chimiques.

L'étude morphologique semble, au premier abord, montrer que le drainage d'une tourbe fait subir au sol une évolution inverse de celle constatée pour une hydromorphie croissante dans les divers profils de la chaîne hydromorphe décrite au chapitre précédent.

L'hydromorphie croissante entraîne, en effet, une augmentation de l'épaisseur des horizons organiques, l'apparition des structures fibreuses et une diminution de la fraction minérale.

De plus, en surface, une « tourbe au stade II » est voisine d'un « sol semi-tourbeux » et une « tourbe au stade III », voisine en surface d'un « sol à gley réduit »\*.

L'examen détaillé des divers profils étudiés dans ce chapitre et dans le précédent montre que les traces d'une forte hydromorphie que porte le sol tourbeux ne disparaissent pas toutes lorsqu'il est drainé.

En effet, en considérant l'intégralité du profil d'une « tourbe au stade II », nous constatons qu'il présente un horizon de débris de racines, placé entre deux horizons riches en matière organique plus fine. Le profil « semi-tourbeux » ne possède pas ce caractère.

Entre une « tourbe au stade III » et le « sol à gley réduit » la différence est moins nette, mais existe. Une « tourbe au stade III » a un pseudogley de texture fine et homogène, alors que le « sol de gley réduit » présente un gley de texture variable, dans laquelle la fraction sableuse peut être assez bien représentée\*\*.

En conclusion, on peut dire qu'une différence morphologique existe entre deux sols qui subissent, à un moment donné, l'action de l'hydromorphie avec la même intensité, lorsque l'un d'entre eux dérive d'une « tourbe drainée » et que l'autre n'a jamais subi d'action hydromorphe plus intense que celle qu'il présente au moment de son examen.

## II) CARACTERES ANALYTIQUES DES PRINCIPAUX STADES EVOLUTIFS DU PROFIL TOURBEUX

Dans ce paragraphe, les méthodes de dosages utilisées, non encore exposées dans le chapitre I, sont résumées. Le détail des méthodes est donné en annexe.

Les résultats obtenus seront ensuite énoncés en adoptant les mêmes modes d'expression que ceux utilisés dans l'étude de la chaîne de sols hydromorphes.

### A) DEFINITION SOMMAIRE DES TECHNIQUES ANALYTIQUES

#### 1) ELEMENTS ORGANIQUES

##### HUMUS

La technique habituelle sera celle de CHAMINADE, mais seront utilisées parallèlement les deux méthodes suivantes :

Méthode au fluorure de sodium.

Le fluorure de sodium est un extractif qui, comme l'oxalate d'ammonium, préconisé dans la méthode CHAMINADE, extrait peu les humus acides. Les résultats obtenus sont donc faibles.

\* Voir figures 14 et 24.

\*\* Voir graphiques relatifs aux textures : figures 15 et 29.



## \* Méthode TIURIN.

Cette méthode complexe permet d'isoler les fractions suivantes :

acides humiques bruns (H 1) qui sont des acides incomplètement saturés, à petites molécules, solubles dans la soude diluée, constituant une forme très mobile et fournissant une structure peu stable. Dans les horizons tourbeux, cette fraction est surévaluée, car la soude oxyde les lignines et fabrique des acides humiques bruns. Plus le sol est évolué par drainage, moins cet inconvénient est sérieux ;

acides humiques liés aux argiles par le calcium (H 2). Leurs molécules sont plus condensées. Ils ne sont solubilisés, par la soude diluée, qu'après décalcification. Dans les sols étudiés, cette fraction est très faible ;

acides humiques liés aux argiles par l'intermédiaire des sesquioxydes de fer ou d'alumine (H 3). Ils sont aussi très polymérisés et constituent avec H 2 un ensemble appelé « acides humiques gris ». H 3 n'est extrait par la soude diluée qu'après élimination des sesquioxydes, parfois abondants dans les sols que nous étudions ;

acides fulviques libres (F 1), solubles dans une solution d'acide sulfurique diluée. Les acides fulviques sont composés d'acides organiques et de composés phénoliques. Ils attaquent les argiles et les dégradent. Ils sont mobiles ;

acides fulviques liés aux acides humiques (F 2). Ils sont moins acides et attaquent en conséquence peu les argiles. Ils sont peu mobiles, composés d'uronides et de polysaccharides en chaînes, adsorbés par les molécules d'acides humiques.

L'utilisation simultanée de ces trois méthodes a pour but essentiel de mettre en évidence la variation des teneurs en acides humiques (c'est ce que nous appelons « humus »), dans un profil tourbeux, au cours de son évolution par drainage.

Nous ne retiendrons que les conclusions, confirmées par l'ensemble des résultats obtenus à l'aide des trois méthodes. Ceci permettra de passer outre aux critiques que l'on pourrait formuler sur chacune d'entre elle.

## 2) TESTS BIOLOGIQUES

### a) CELLULOYSE

#### α) EN AEROBIOSE

Technique de WINOGRADSKY, sur boîte de PÉTRI contenant un gel de silice enrichi par une solution nutritive exempte de carbone. Sur le gel est placée une feuille de papier filtre qui estensemencée avec de la terre. L'activité microbienne s'apprécie par l'état de dégradation du papier filtre.

#### β) EN ATMOSPHERE PRIVEE D'OXYGENE

Des boîtes de PÉTRI, analogues aux précédentes, sont placées non plus à l'air libre, mais dans une enceinte privée d'oxygène.

#### γ) EN ANAEROBIOSE

Un tube à essai, contenant une solution nutritive et un fragment de papier filtre, estensemencé avec de la terre puis passé à la trompe à vide pour éliminer l'air qu'il contient. Il est ensuite scellé. L'activité des micro-organismes s'apprécie à la rapidité de désagrégation de la cellulose.

### b) FIXATION D'AZOTE

#### α) EN AEROBIOSE

Technique de WINOGRADSKY avec des boîtes de PÉTRI contenant un gel de silice enrichi en tous les éléments sauf en azote. Ces boîtes sontensemencées à l'aide de grains de terre. Le pourcentage des grains donnant une colonie bactérienne traduit l'activité de la fixation d'azote.

Technique TCHAN. (Suspensions-dilutions, en tube à essai). Les tubes contiennent un milieu liquide, riche en éléments nutritifs, sauf en azote. Ils sontensemencés avec un même volume de dilutions de terre plus ou moins poussées. Plus il y a de tubes possédant un voile bactérien, pour de fortes dilutions, plus le sol est riche en fixateurs.

#### β) EN ATMOSPHERE PRIVEE D'OXYGENE

Nous utilisons la technique WINOGRADSKY et mettons les boîtes de PÉTRI dans une atmosphère non oxygénée.

c) **AMMONIFICATION**

Méthode COPPIER et POCHON. Du sable de Fontainebleau est enrichi en éléments nutritifs. L'azote y est apporté sous forme de peptone. Ce milieu estensemencé avec de la terre. Après incubation, l'azote ammoniacal libéré par la microflore ammonifiante est mesuré.

d) **NITRIFICATION** $\alpha$ ) **VITESSE DE NITRIFICATION**

Un milieu liquide, enrichi en éléments nutritifs, dans lequel l'azote est sous forme ammoniacale, estensemencé avec une certaine quantité de terre. L'apparition de nitrite est déterminée à l'aide du réactif de GRIESS.

 $\beta$ ) **POUVOIR NITRIFICATEUR**

Méthode KAUFFMANN. Cette technique se subdivise en deux tests :

test des germes nitreux : le principe est celui de la méthode précédente ;

test des germes nitriques : l'azote de la solution nutritive est sous forme de nitrite et les nitrates produits sont mis en évidence par un réactif coloré.

e) **HUMIFICATION**

L'activité des organismes, capables d'utiliser comme source carbonée et azotée des acides humiques solubles dans la soude et précipitables par l'acide chlorhydrique, est évaluée. Des boîtes de PÉTRI contenant du silocogel reçoivent une solution standard de WINOGRADSKY et une solution d'acides humiques. L'ensemencement a lieu par saupoudrage de terre. Plus les germes sont nombreux, plus l'humification est bonne.

3) **ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE**

Méthodes TRUOG et SAUNDER.

4) **BASES TOTALES**

Elles sont déterminées soit après attaque nitrique, soit après attaque triacide (principe de la méthode HARDY et BAYENS). Les dosages s'effectuent par voie chimique.

5) **ACIDE PHOSPHORIQUE TOTAL**

Il se détermine après attaque nitrique. Le dosage se réalise suivant la méthode LORENTZ (précipité de phosphomolybdate).

6) **HUMIDITES**

Les humidités à pF 4,2, pF 4 et pF 3,6 sont déterminées à l'aide de la presse à membrane.

Les humidités à pF 3 sont obtenues par la chambre à dépression et, dans certains cas, à titre de contrôle, par la méthode de centrifugation.

Les humidités à pF 2,5 sont obtenues par la chambre à dépression. Elles sont parfois contrôlées par la méthode de succion (méthode BOURUCOS).

7) **PERMEABILITE**

Méthode HENIN.

8) **PLASTICITE**

Méthode de la terre humidifiée, roulée en bâtonnets.

## B) RESULTATS ANALYTIQUES OBTENUS

Nous passerons successivement en revue :

- la granulométrie,
- les éléments organiques,
- les caractères biologiques,
- le complexe absorbant et l'acide phosphorique assimilable.
- les bases totales et l'acide phosphorique total,
- les acidités et le pouvoir tampon,
- la nature minéralogique des argiles,
- le fer et le rapport silice/alumine,
- les caractères physiques concernant les relations sol/eau.

### 1) GRANULOMETRIE

La variation des textures dans les divers profils est résumée par le graphique suivant (fig. 29) qui donne les pourcentages en poids des sables, du limon, de l'argile et de la matière organique totale.

L'évolution du profil tourbeux par drainage se traduit par une augmentation relative des fractions minérales (argile + limon + sable), consécutive à la disparition des matières organiques. La proportion de chaque fraction minérale (argile ou limon ou sable) par rapport à la somme des fractions minérales (argile + limon + sable) ne varie pas, en passant d'un stade à l'autre, si on compare des horizons situés aux mêmes niveaux dans les profils.

Au stade III, l'intervention des dépôts récents n'influencent guère la granulométrie puisque ces dépôts ont une texture analogue à celle des sols qu'ils recouvrent.

Les sols évolués, dérivés de tourbes, ont des textures fines, les rendant compacts, imperméables et plastiques à l'état humide. A l'état sec, ils sont durs et présentent des fentes de retrait, jamais très larges, mais pouvant atteindre 1 m de profondeur.

Signalons que lorsque le sol est très évolué et dégradé par la culture il n'est plus irrigué, donc plus alluvionné. Sa surface est alors soumise à une certaine érosion en saison des pluies, entraînant les argiles et laissant sur place les sables.

### 2) ELEMENTS ORGANIQUES

Les graphiques qui précèdent mettent en évidence la chute rapide des taux de matière organique totale, exprimée en poids, dans les divers horizons de surface et, au sein du profil au stade II, la plus grande richesse en matière organique de l'horizon sous-jacent.

Nous allons étudier plus en détail la variation des éléments organiques en nous référant à des courbes tracées suivant les principes déjà énoncés dans le chapitre précédent, que nous rappelons brièvement :

Pour chaque élément dosé (matière organique totale, ou azote total, ou humus, etc.) on trace deux coordonnées. En abscisse, on figure, à des distances égales, des repères correspondant aux trois stades évolutifs étudiés. En ordonnée, on place l'échelle des valeurs de l'élément dosé.

Pour chaque horizon de chaque stade, on porte ensuite les valeurs obtenues à l'analyse. On joint enfin à l'aide de courbes :

- les valeurs correspondant à l'horizon organique de surface des trois profils étudiés ;
- les valeurs relatives aux horizons organiques intermédiaires ;
- les valeurs des horizons organiques profonds ;
- les valeurs des horizons non organiques (gley).

On distinguera donc une courbe de plus que dans l'étude de la chaîne des sols hydromorphes : celle relative aux horizons organiques intermédiaires.

Il est évident qu'au stade III les courbes concernant les trois horizons organiques convergeront en un point unique puisqu'il n'y a plus qu'un seul horizon organique peu épais.

Pour mettre en évidence le sens des variations provoquées par un dépôt d'« alluvion récente » sur les profils des stades évolués, un quatrième repère, permettant de donner les valeurs relatives à ce dépôt, sera figuré en abscisse.

Les résultats obtenus seront, ici encore, exprimés par rapport à une unité de poids, puis par rapport à une unité de volume.



## GRANULOMETRIE

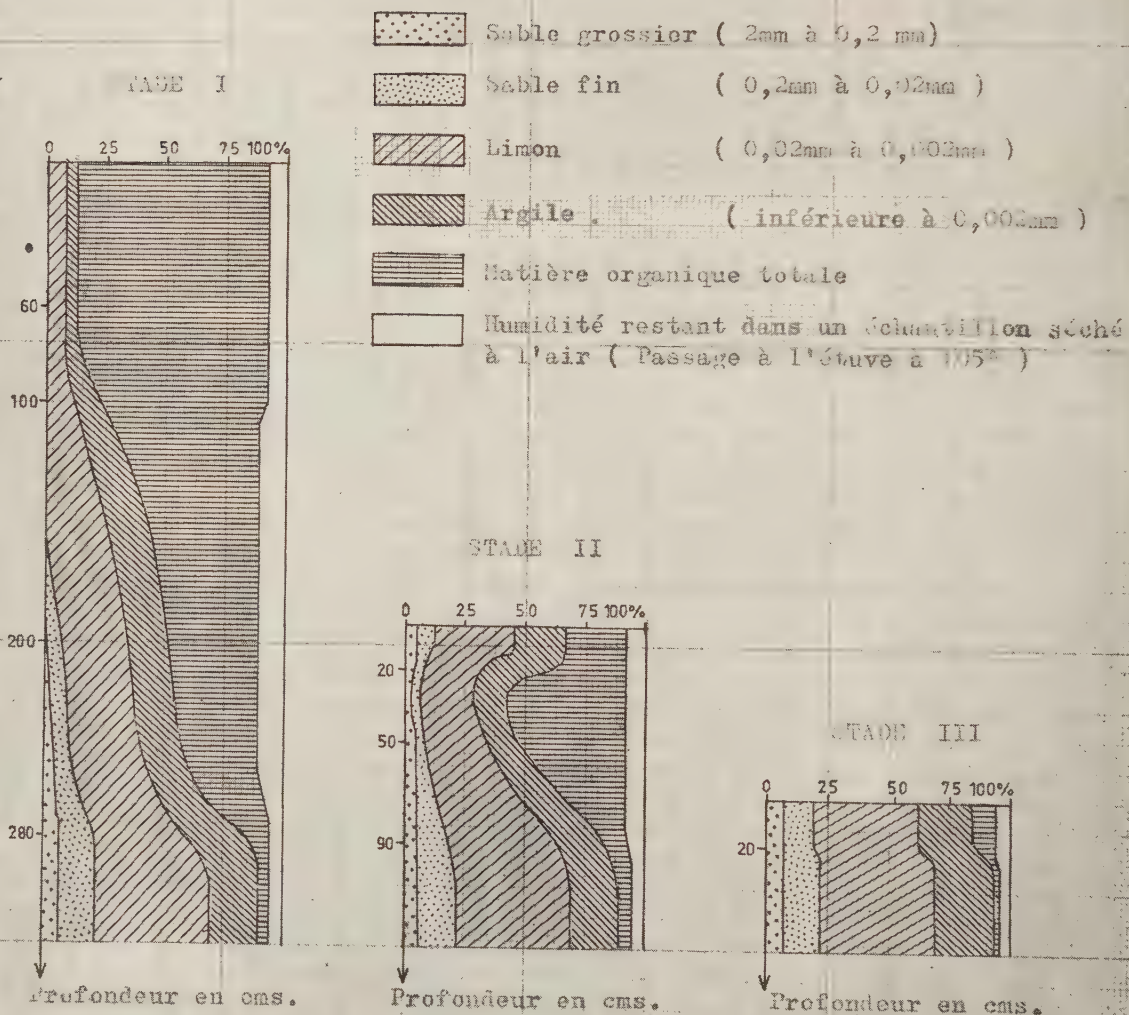


Figure 29

a) **EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS** (fig. 30, 30 bis, 30 ter et 30 quater)

a) MATIERE ORGANIQUE TOTALE. AZOTE TOTAL. C/N. ACIDES HUMIQUES. TAUX D'HUMIFICATION

Ces courbes conduisent aux conclusions suivantes :

$\alpha$ ) VARIATIONS ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS D'UN PROFIL TOURBEUX SOUMIS AU DRAINAGE

$\alpha'$ ) VARIATIONS RELATIVES A LA MATIERE ORGANIQUE TOTALE, A L'AZOTE TOTAL, A L'HUMUS ET AU RAPPORT C/N

Il y a, entre les stades I et III, pour tous les horizons organiques, une chute brutale des teneurs :

en matière organique totale,  
en azote total.  
en acides humiques :

(cette décroissance est sensible quelle que soit la technique analytique utilisée. Avec la méthode TIURIN, c'est la somme : H 1 + H 2 + H 3 qui est prise en considération \*. Cette somme est élevée par rapport aux résultats donnés par les autres méthodes. Les différences s'expliquent partiellement par une surestimation de la fraction H 1 due au procédé analytique. De plus, les dosages se réalisant sur trois prises de terre, la même substance risque d'être dosée à plusieurs reprises.)

Au cours de l'évolution, le rapport C/N décroît.

De plus, dans les horizons non organiques, les variations sont bien plus faibles que dans les autres mais s'amorcent dans le même sens.

Entre les stades I et II, seul l'horizon de surface évolue nettement. Ce n'est donc que pour lui que les valeurs analytiques changent.

**En résumé**, les divers éléments organiques qui viennent d'être étudiés décroissent :

pour l'horizon de surface, très rapidement, du début à la fin de l'évolution ;  
pour les horizons organiques intermédiaires et profonds, fortement, mais seulement à partir du stade II ;  
pour l'horizon non organique, faiblement et seulement à partir du stade II.

$\beta'$ ) VARIATIONS RELATIVES AUX TAUX D'HUMIFICATION

Pour l'horizon de surface, les taux d'humification croissent puis décroissent au cours de l'évolution, si bien que le stade II présente les taux les plus élevés. Il y a là une analogie avec le « sol à gley réduit » décrit dans le premier chapitre.

Dans les autres horizons, l'évolution entraîne une décroissance des taux d'humification, qui se réalise entre les stades II et III. Les variations sont faibles dans les horizons non organiques tout au long de l'évolution.

$\beta$ ) VARIATIONS AU SEIN DE PROFILS CORRESPONDANT A DES STADES D'EVOLUTION PLUS OU MOINS AVANCES

$\alpha'$ ) VARIATIONS RELATIVES A LA MATIERE ORGANIQUE TOTALE, A L'AZOTE TOTAL, AU C/N

La diminution de la valeur de ces éléments, du sommet à la base du profil, observée au stade I, est modifiée au stade II par la chute brusque des teneurs dans l'horizon organique de surface, alors que celles-ci se maintiennent dans les horizons sous-jacents.

$\beta'$ ) VARIATIONS RELATIVES A L'HUMUS

Ce sont les horizons organiques profonds qui sont les plus riches en humus et présentent les meilleurs taux d'humification, aussi bien au stade I qu'au stade II.

Pour conclure cette étude relative aux éléments organiques exprimés par rapport à un poids, nous dirons :

L'évolution par drainage provoque une forte chute des éléments organiques (matière organique totale, azote, C/N, acide humique) ;

en surface des terres, les taux d'humification sont les plus élevés pour un stade évolutif moyen (il y a analogie avec ce qui existe dans la chaîne des sols hydromorphes) ;

les « alluvions fluviales » présentent des caractères très voisins des horizons à gley.

Avant d'exprimer les résultats ci-dessus par rapport à une unité de volume, on peut commenter les chiffres obtenus concernant les différentes formes d'acides humiques isolées par la méthode TIURIN, puis les valeurs des acides fulviques donnés par l'extraction au fluorure de sodium et suivant la méthode TIURIN.

\* Voir page 71 .

ÉLÉMENTS ORGANIQUES EXPRIMÉS PAR RAPPORT  
A UN POIDS DE TERRE SÉCHÉE A 105°

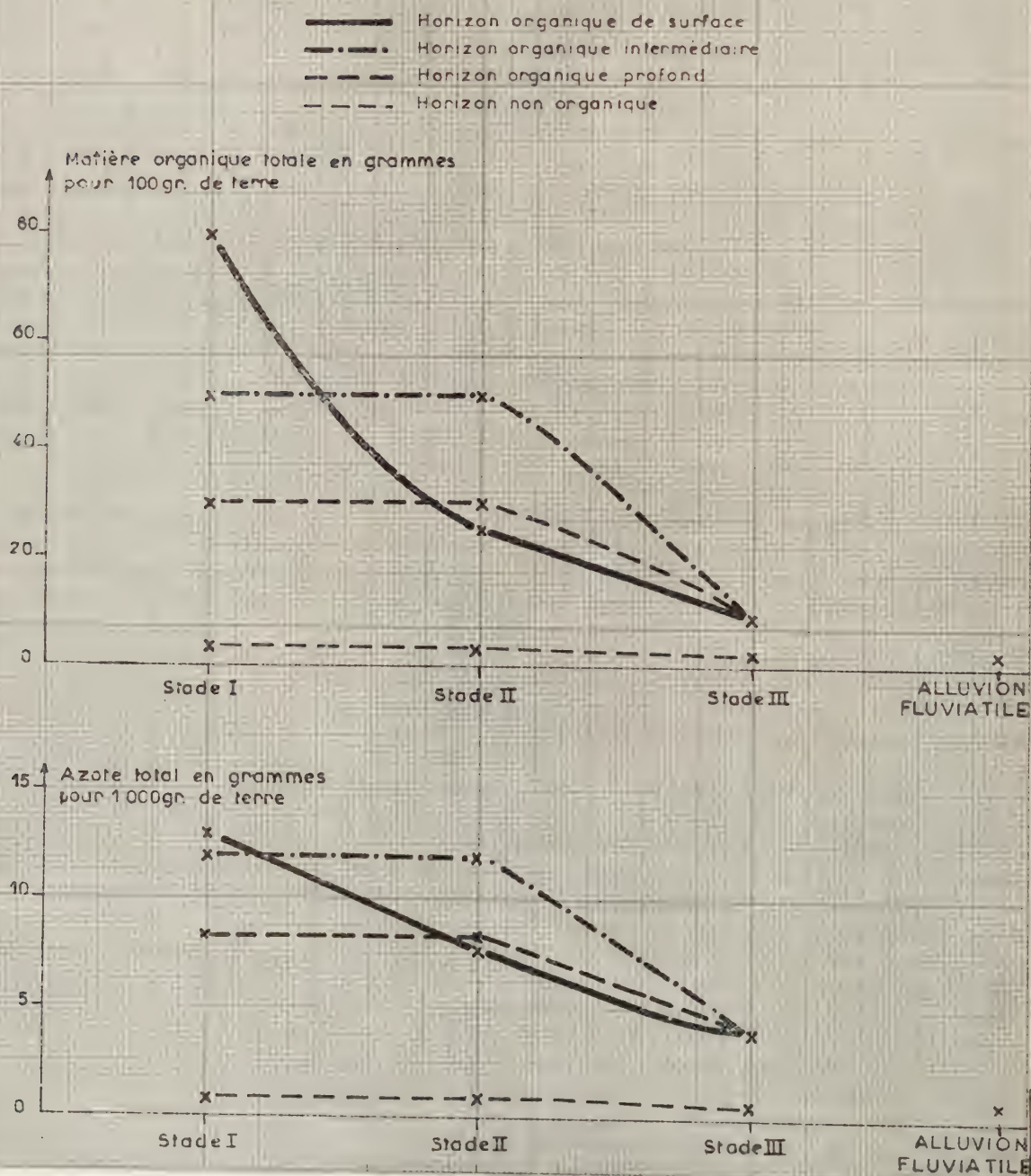


Figure 30



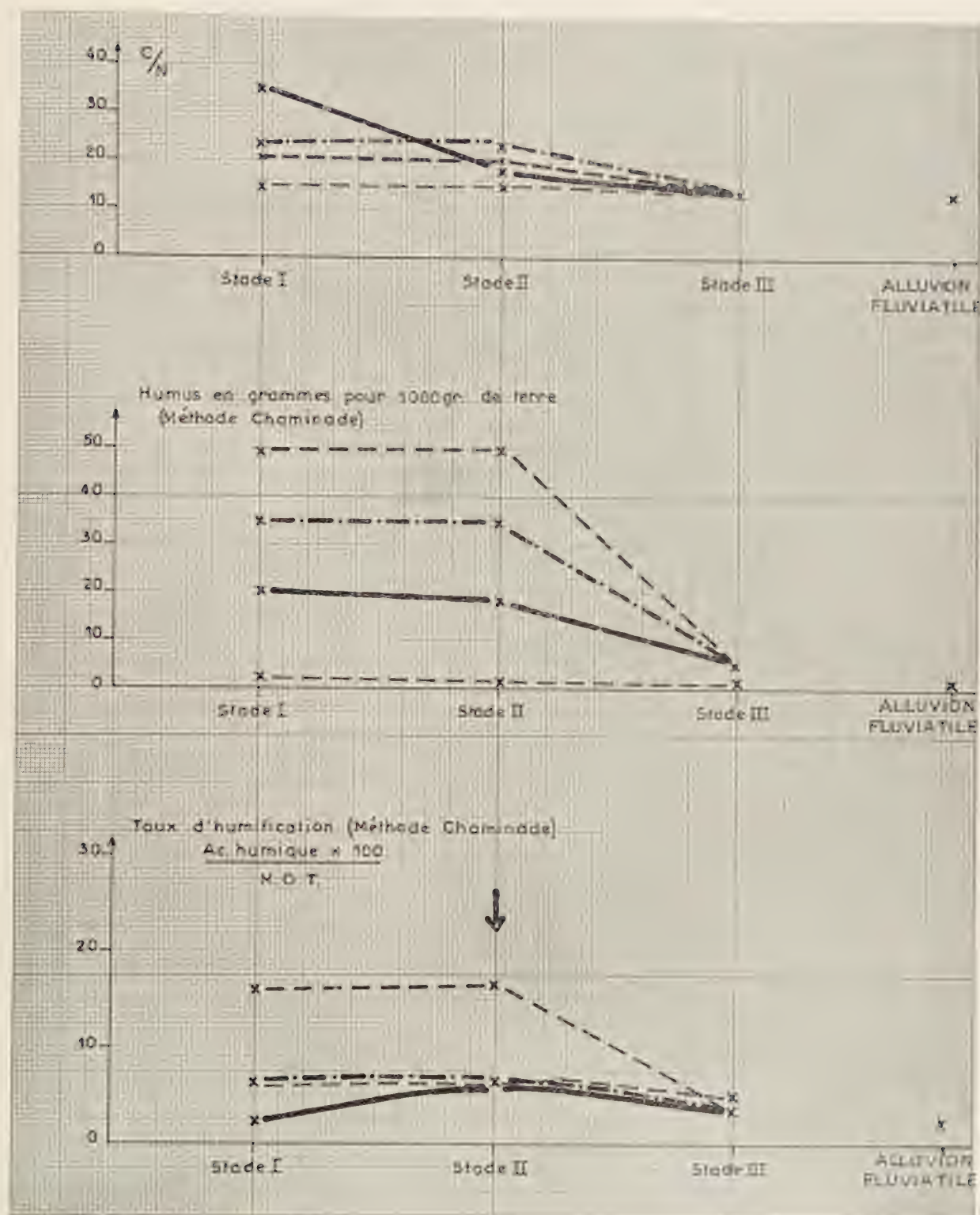


Figure 30 bis

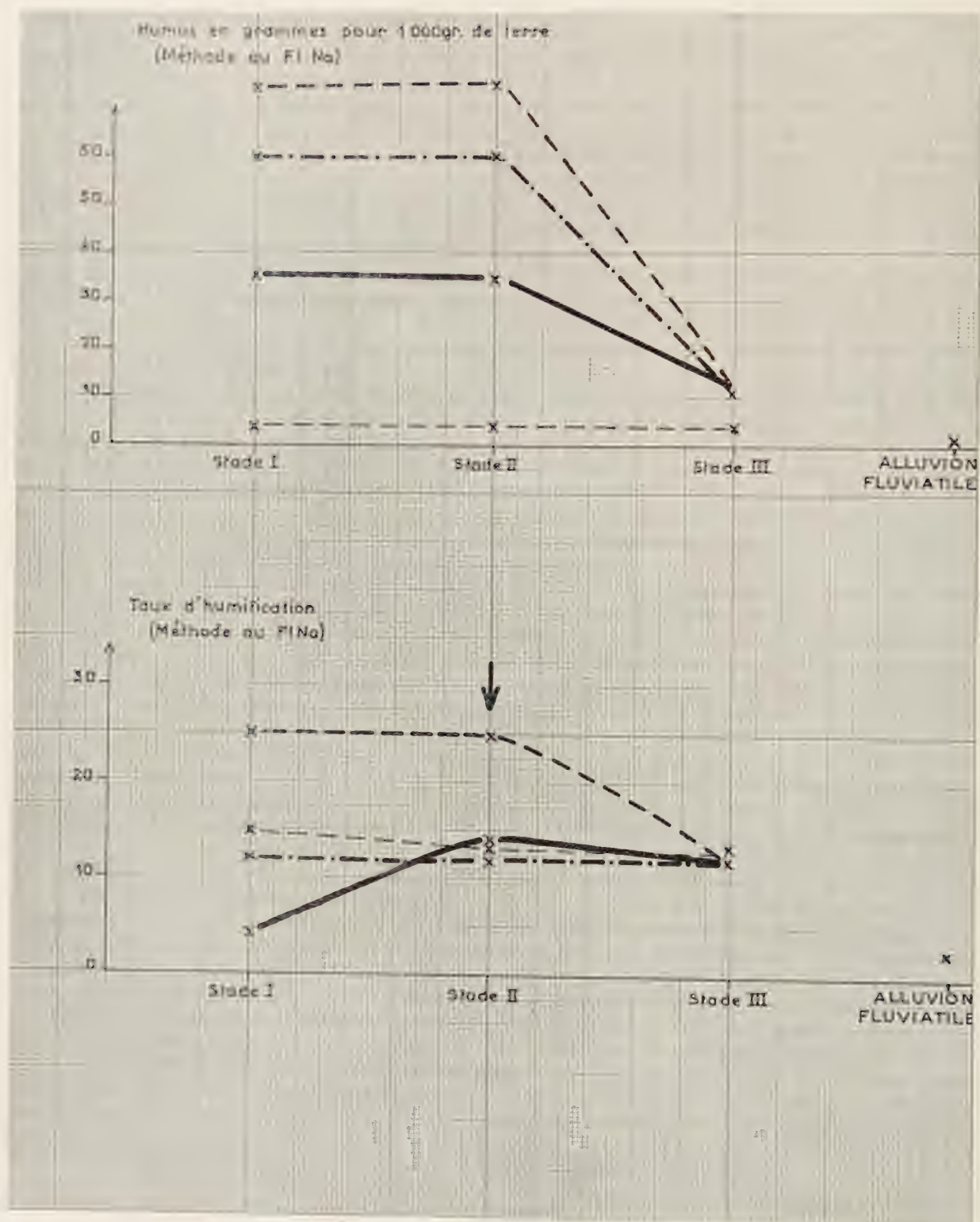
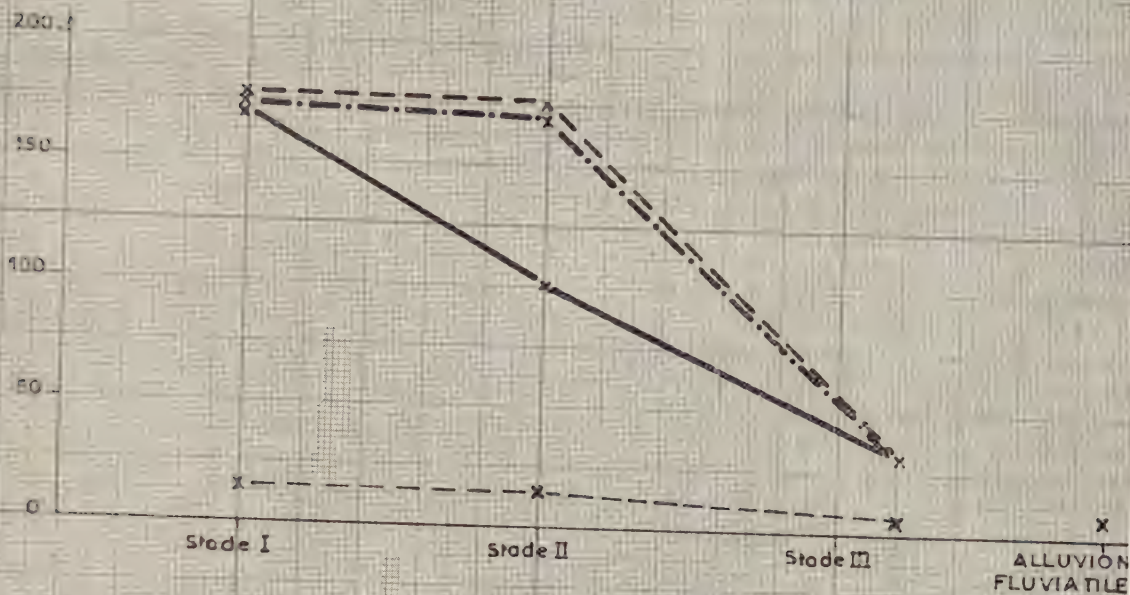


Figure 30 ter



Humus en grammes pour 1000gr de terre  
(Méthode Tiurin:  $H_1 + H_2 + H_3$ )



Taux d'humification  
(Méthode Tiurin)

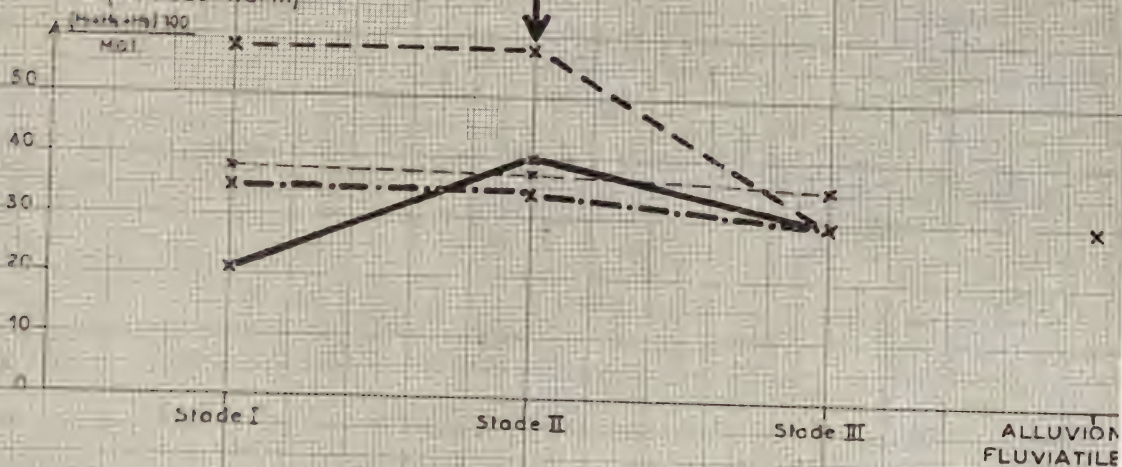


Figure 30 quater



## b) FRACTIONS D'ACIDES HUMIQUES ISOLEES PAR LA METHODE TIURIN ET ACIDES FULVIQUES

## α) ACIDES HUMIQUES

Sans vouloir nous engager trop loin dans les fractionnements des acides humiques, il est utile de donner, de manière concise, les résultats obtenus.

Quel que soit le degré d'évolution du profil, nous avons toujours dans les horizons organiques :

$$\begin{aligned} H 1 &> H 2 + H 3 \\ \text{et } H 3 &> H 2 \end{aligned}$$

Les acides humiques bruns (H 1), surévalués par cette méthode utilisant la soude, ont un pourcentage, exprimé par rapport à la somme  $H 1 + H 2 + H 3$ , qui diminue au cours de l'évolution.

Il en résulte que, lorsque le drainage est ancien, les acides humiques existent surtout sous forme liée aux argiles. C'est la forme H 3, liée par l'intermédiaire des sesquioxydes (principalement les sesquioxydes d'alumine puisque les « sols tourbeux » sont appauvris en fer), qui prédomine largement sur H 2.

Dans les horizons non organiques, nous avons :

$$\begin{aligned} H 2 + H 3 &> H 1 \\ \text{et } H 1 &> H 3 > H 2 \end{aligned}$$

Il en est de même dans les « alluvions fluviales ».

**En résumé**, les formes très mobiles (H 1) semblent abondantes, compte tenu de leur surestimation, dans les horizons riches en matières organiques. Les acides humiques liés aux argiles par l'intermédiaire des sesquioxydes sont de mieux en mieux représentés à mesure que les taux de matières organiques totales diminuent et qu'en conséquence le milieu est soumis à un enrichissement relatif en argile.

D'après LAATSCH (1963), les acides humiques liés aux argiles seraient moins faiblement minéralisés que ceux qui sont libres. Leur présence entraîne donc une stabilisation des stocks organiques.

## β) ACIDES FULVIQUES

La méthode au fluorure de sodium donne des quantités d'acides fulviques supérieures à celles des acides humiques. L'ordre de grandeur est : 60 % d'acides fulviques et 40 % d'acides humiques.

La méthode de TIURIN donne moins d'acides fulviques que d'acides humiques et, d'une manière schématique, nous avons  $F 2 = 4 \cdot F 1$ , ce qui signifie que les acides fulviques sont surtout représentés par la fraction combinée aux acides humiques et que les formes mobiles sont moins importantes\*.

Ces deux méthodes n'ont pas mis en évidence de variations nettes entre les proportions d'acides humiques et d'acides fulviques au cours de l'évolution par drainage.

Les proportions entre F 2 et F 1 semblent assez constantes.

**En résumé**, nous dirons que dans un sol de marais tourbeux les acides humiques bruns (H 1) sont très abondants. Viennent ensuite les acides humiques liés aux argiles par l'intermédiaire des sesquioxydes (H 3).

Au cours de l'évolution, H 1 décroît plus vite que H 3.

Les acides fulviques existent surtout sous forme liée aux acides humiques.

## b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME (fig. 31 et 31 bis)

Les densités apparentes, nécessaires aux calculs qui doivent être effectués pour passer d'une expression en poids à une expression en volume, sont déterminées à l'aide de prélèvements réalisés sur le terrain en saison des pluies. Les sols sont donc gorgés d'eau. Ce qui revient à dire que déshydratés ils seraient plus denses.

Les courbes qui suivent montrent que les densités croissent dans de fortes proportions lorsque le profil tourbeux évolue et que cette augmentation est particulièrement marquée pour l'horizon de surface.

La légère augmentation de la densité, que l'on constate entre les stades I et II, relative aux horizons organiques intermédiaires et profonds, est due à ce que, au stade I, lorsque la nappe s'élève, les horizons de racines grossières ont tendance à flotter, surtout s'ils ont été déshydratés pendant la saison sèche. Ainsi, les horizons sous-jacents n'étant nullement comprimés occupent un fort volume. Au stade II, cet étirement du profil ne se produit plus.

\* Voir page 71.

# ELEMENTS ORGANIQUES EXPRIMES PAR RAPPORT A UN VOLUME DE SOL HUMIDE

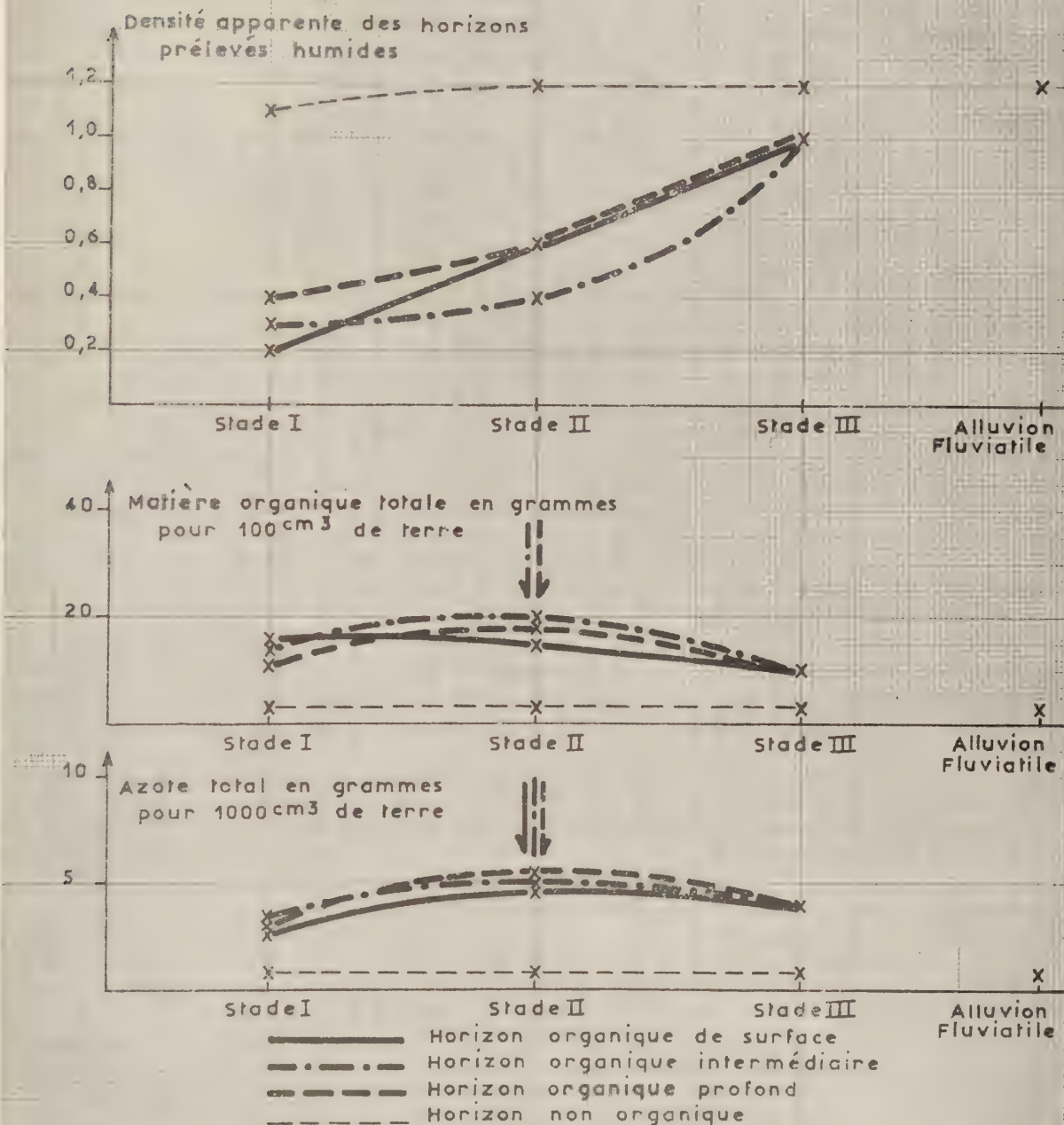


Figure 31

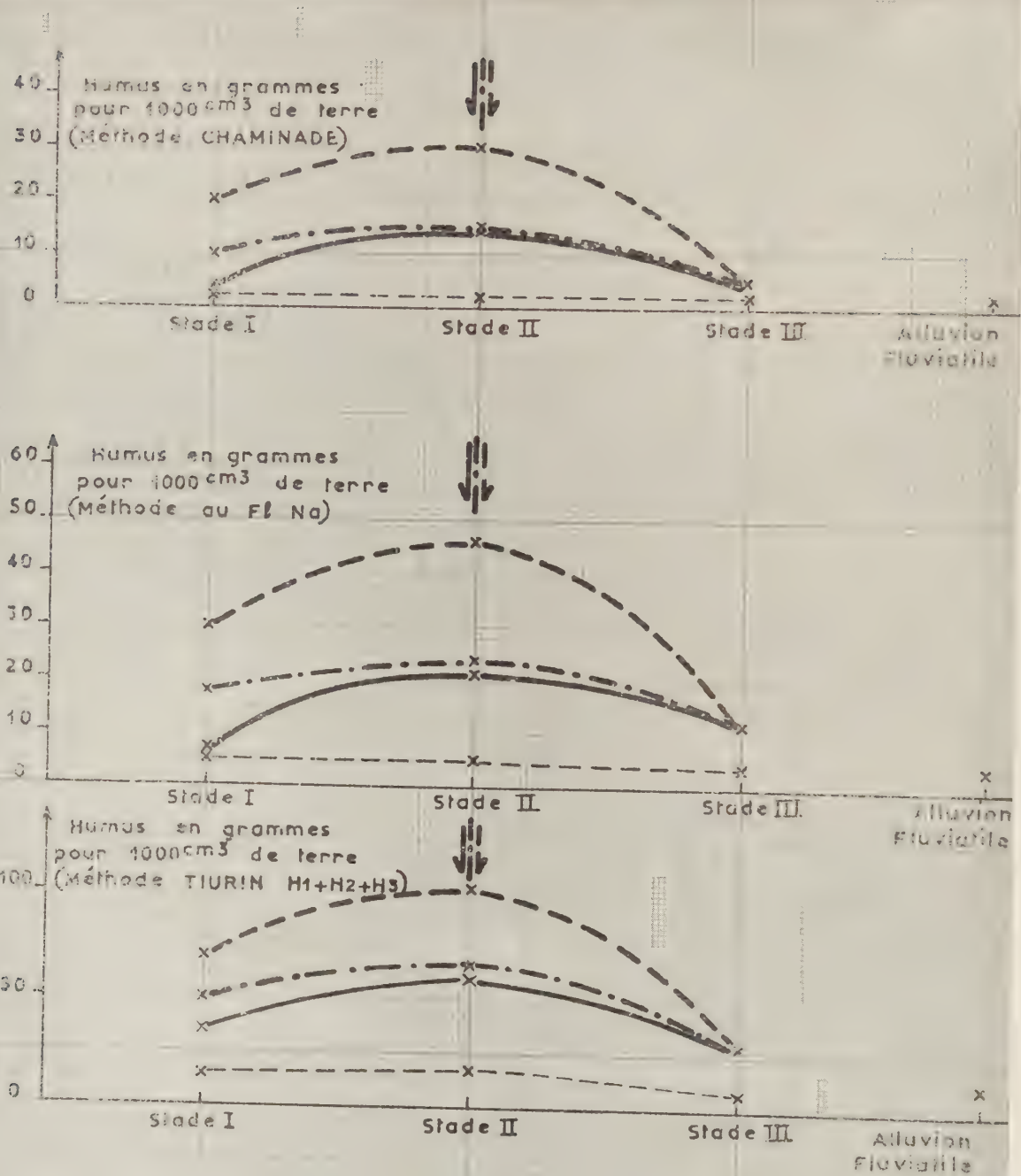


Figure 31 bis



#### α) VARIATIONS ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS D'UN PROFIL TOURBEUX SOUMIS AU DRAINAGE

L'expression des résultats par rapport à un volume entraîne des modifications profondes de l'aspect des courbes obtenues avec une expression en poids. Les courbes prennent une forme plus voisine d'une ligne horizontale et présentent un sommet au niveau du stade II.

Il y a donc une homogénéisation plus grande des valeurs entre les différents stades évolutifs. Toutefois, le stade II apparaît comme étant très bien pourvu en matière organique totale, en azote et surtout en humus.

En ce qui concerne les C/N, les taux d'humification, les comparaisons entre acides humiques et acides fulviques, les proportions entre les différentes formes d'acides humiques isolées par la méthode TIURIN, les résultats sont les mêmes que pour une expression par rapport à un poids.

#### β) VARIATIONS AU SEIN DE PROFILS CORRESPONDANT A DES STADES D'EVOLUTION PLUS OU MOINS AVANCES

En ce qui concerne la matière organique totale et l'azote, les différences en fonction de la profondeur des prélèvements sont faibles pour l'ensemble des horizons organiques.

Pour l'humus, les différences sont faibles entre les horizons organiques de surface et intermédiaires, mais plus marquées entre ces horizons et l'horizon organique profond.

L'ensemble des résultats exprimés par rapport à une unité de volume d'un sol humide peut être résumé de la manière suivante :

pour tous les horizons des profils, le stade II donne les valeurs les plus fortes en ce qui concerne :

l'azote total,  
les acides humiques,  
les taux d'humification ;

de plus, à ce stade, les teneurs en matière organique totale sont, en surface, à peine plus faibles qu'au stade I ;

enfin, au stade II, les C/N cessent dans la partie supérieure du profil d'être trop élevés.

Ainsi, un profil tourbeux moyennement évolué présente, en surface, d'excellents caractères concernant les éléments organiques. Il possède donc une analogie avec les « sols à gley réduit » et « semi-tourbeux ».

### 3) CARACTERES BIOLOGIQUES

Pour étudier la variation des caractères biologiques liée au degré d'évolution des sols par drainage, on adoptera le plan suivant :

brève introduction,  
résultats obtenus,  
interprétation d'études réalisées par MOUREAUX,  
conclusion basée sur nos résultats et sur ceux de MOUREAUX,  
exposé concernant une expérience réalisée en cases lysimétriques,  
résumé d'ensemble.

#### 1) INTRODUCTION

Compte tenu de la nature des résultats donnés, nous utiliserons une représentation graphique différente de celle adoptée jusqu'ici. Nous reviendrons au précédent type de représentation pour l'étude du complexe absorbant, des bases totales et de l'acide phosphorique total.

Pour chaque test réalisé, on trace deux coordonnées. En abscisse, figure la durée de l'incubation de l'échantillon mis dans des conditions favorisant le développement des germes ; en ordonnée, une échelle permettant d'évaluer l'activité de ces germes, par exemple, pour les cellulolytiques, le pourcentage de grains de terre donnant des colonies bactériennes.

Ces coordonnées permettent de tracer les courbes d'activité des germes contenus dans les horizons de surface des trois stades évolutifs et dans l'« alluvion fluviale ».

Cette représentation graphique rend possible l'appréciation de la rapidité du développement des germes qui témoigne de leur efficacité.

Des tests ont été réalisés pour évaluer la chute de l'activité microbienne avec la profondeur des prélèvements. Ils ont permis de tracer des courbes, voisines de l'axe des abscisses, qui se chevauchent l'une l'autre et qui sont si peu instructives qu'elles ne seront pas reproduites.

Les groupements physiologiques étudiés concernent :

- la cellulolyse,
- la fixation d'azote atmosphérique,
- l'ammonification,
- la nitrification,
- la disparition des humus.

L'activité microbienne globale sera mise en évidence par la quantité de gaz carbonique dégagé.

Avant de donner les courbes résumant les nombreuses séries de tests effectués, il convient de préciser dans quelles conditions ils sont réalisés.

#### a) TECHNIQUE DE PRELEVEMENT

##### α) EPOQUE DE PRELEVEMENT

MOUREAUX, dans une étude de la variation de l'activité microbienne de sols hydromorphes malgaches au cours de l'année, n'a pu mettre nettement en évidence l'influence de la date du prélèvement des échantillons de terre sur l'activité microbienne. Les difficultés proviennent de ce que l'activité se compose d'explosions successives, sans lien apparent avec l'époque du prélèvement.

Sur les tourbes en cours d'évolution par drainage, des séries de tests nous ont indiqué que, sur les hauts-plateaux possédant au cours d'une année une saison des pluies et une saison sèche, le début de la saison sèche était assez favorable à l'activité microbienne. A cette période, les stades peu évolués sont en effet moins soumis à l'hydromorphie, donc plus aérés, et les stades évolués ne sont pas encore trop desséchés. En conséquence, cette époque a été retenue.

Les prélèvements ont eu lieu plusieurs années consécutives.

##### β) PROFONDEUR DES PRELEVEMENTS

Ils s'effectuent dans les cinq premiers centimètres des divers horizons pris en considération.

##### γ) PRECAUTIONS PRISES

Chaque prélèvement est précédé d'un examen minutieux des sols pour éviter de retenir les surfaces récemment soumises au feu et les horizons organiques trop abondamment alluvionnés.

#### b) TECHNIQUE DE L'ENSEMENCEMENT

L'ensemencement a lieu à partir d'un même volume d'échantillon humide. Les cultures sont mises à incuber dans les trois jours qui suivent le prélèvement.

#### c) DETERMINATION DES VALEURS PORTEES SUR LES COURBES

Les tests réalisés ont conduit à l'établissement de multiples courbes d'activité microbienne, que nous ne pouvons reproduire ici.

Nous donnerons seulement des graphiques établis à partir de moyennes arithmétiques.

Cette méthode, basée sur les répétitions destinées à mettre en évidence la reproductibilité d'un phénomène, permet de ne pas se laisser influencer par les explosions d'activité d'allure anarchique. Son principal inconvénient réside dans la longueur du travail à fournir.

## 2) RESULTATS DES TESTS

### a) CELLULOLYSE

#### $\alpha$ ) CELLULOLYSE AEROBIE (fig. 32, 33 et 34)

Les courbes précédentes montrent que l'évolution entraîne, en surface des sols, une amélioration de l'activité des cellulolytiques qui est particulièrement faible au départ.

Les « alluvions fluviales » sont, par contre, très actives. Elles possèdent des colonies rouges, alors que les sols hydromorphes ont des colonies jaunes. Les germes présentent pourtant individuellement la même morphologie.

Les résultats obtenus dans les horizons profonds accusent une décroissance brusque des cellulolytiques avec la profondeur. L'activité de l'ensemble des horizons profonds est généralement très inférieure à celle observée pour l'horizon de surface au stade I.

#### $\beta$ ) CELLULOLYSE EN ATMOSPHERE PRIVEE D'OXYGENE

Les courbes obtenues sur silicogel (fig. 32) montrent que l'évolution provoque une amélioration de la cellulolyse, mais que celle-ci n'est nullement négligeable au stade I.

En tube scellé, les différences sont peu marquées entre les différents stades, ce qui confirme une certaine activité des cellulolytiques au stade I.

Il y a encore décroissance de l'activité microbienne avec la profondeur, mais elle est moins brutale que pour les germes aérobies.

#### $\gamma$ ) CELLULOLYSE GLOBALE

Au stade I, dans l'horizon de surface, les celluloses peuvent être décomposées par des germes anaérobies assez actifs. En période sèche, l'oxygénation partielle de cet horizon rend, de plus, possible l'intervention des germes aérobies.

Ces résultats tendent à montrer qu'au stade I un affinement des résidus végétaux, obtenu par les actions alternatives de plusieurs groupements microbiens, s'amorce. Les matières organiques ainsi obtenues, plus denses que les autres, tombent par gravité à travers la trame végétale non encore désagrégée et s'accumulent en profondeur.

L'origine de l'horizon organique profond, constitué de matières organiques fines, est double : ces matières proviennent non seulement de l'altération de l'horizon de surface du sol tourbeux, mais aussi de l'apport oblique, par les eaux, du produit de l'altération des matières organiques grossières appartenant aux sols voisins « semi-tourbeux ».

L'évolution par drainage d'un sol tourbeux entraîne en surface une nette amélioration de la cellulolyse globale.

Il convient de noter que des tests réalisés sur milieux à pH de 5,5, puis sur milieu à pH de 4,5 ont donné des résultats voisins. La forte acidité freine donc peu la cellulolyse.

Des tests relatifs à l'activité des champignons, pratiqués sur des milieux analogues mais possédant des pH encore plus acides (pH 4), ont montré que la majorité des champignons qui se développent au début de l'incubation meurent rapidement. Ils ont donc peu d'action sur la cellulolyse.

Tout apport d'« alluvion fluviale » enrichit le sol en cellulolytiques. Leur développement sera ensuite fonction des conditions du milieu.

### b) FIXATION D'AZOTE ATMOSPHERIQUE

#### $\alpha$ ) FIXATEURS EN AEROBIOSE

##### $\alpha'$ ) SUR MILIEU SOLIDE (SILICOGEL) (fig. 35)

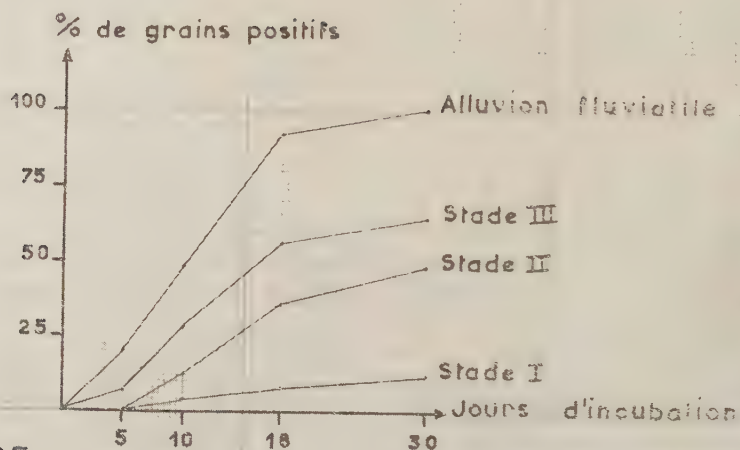
Ces courbes montrent qu'au stade I l'activité est presque nulle. Ce n'est, en effet, qu'à partir du vingtième jour d'incubation que la fixation débute. Ceci n'est pas surprenant puisque les germes présents sont des *Beijerinckia* et qu'ils sont très exigeants en oxygène.

L'évolution par drainage favorise les fixateurs, qui restent pourtant toujours peu actifs comparés à ceux des « alluvions fluviales ».

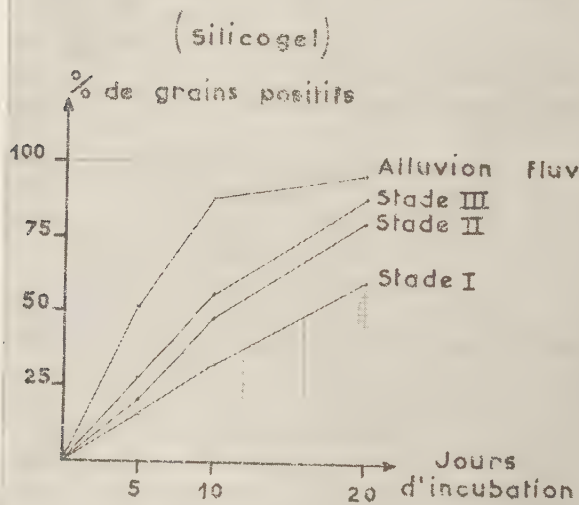
Les résultats obtenus sur les horizons profonds montrent évidemment une décroissance très rapide de la densité des germes avec la profondeur.



# CELLULOLYSE AEROBIE (Silicogel)



## CELLULOLYSE EN ATMOSPHERE PRIVEE D'OXYGENE (silicogel)



## CELLULOLYSE ANAEROBIE (Tubes scellés)

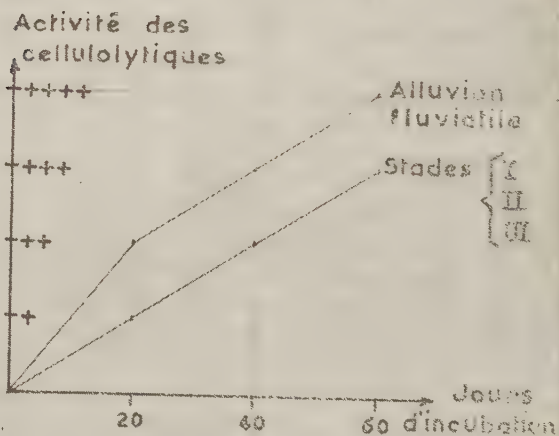


Figure 32

Fig. 33 et 34

## CELLULOLOSE AEROBIE SUR SILICOGEL

APRES 24 JOURS D'INCUBATION

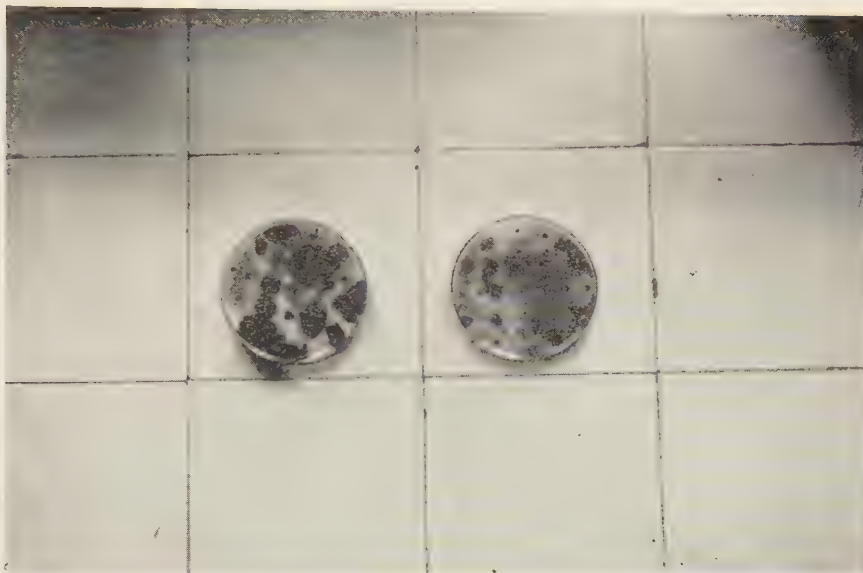


Fig. 33.

A droite : colonies bactériennes jaunes, obtenues par ensemencement avec de la terre provenant de l'horizon de surface d'une tourbe au stade II.

A gauche : colonies bactériennes rouges, obtenues par ensemencement avec de la terre provenant de l'horizon de surface d'une « alluvion fluviale ».



Fig. 34. — Contre-jour mettant en évidence l'attaque du papier filtre par les cellulolytiques provenant de l'horizon de surface d'une tourbe au stade II.

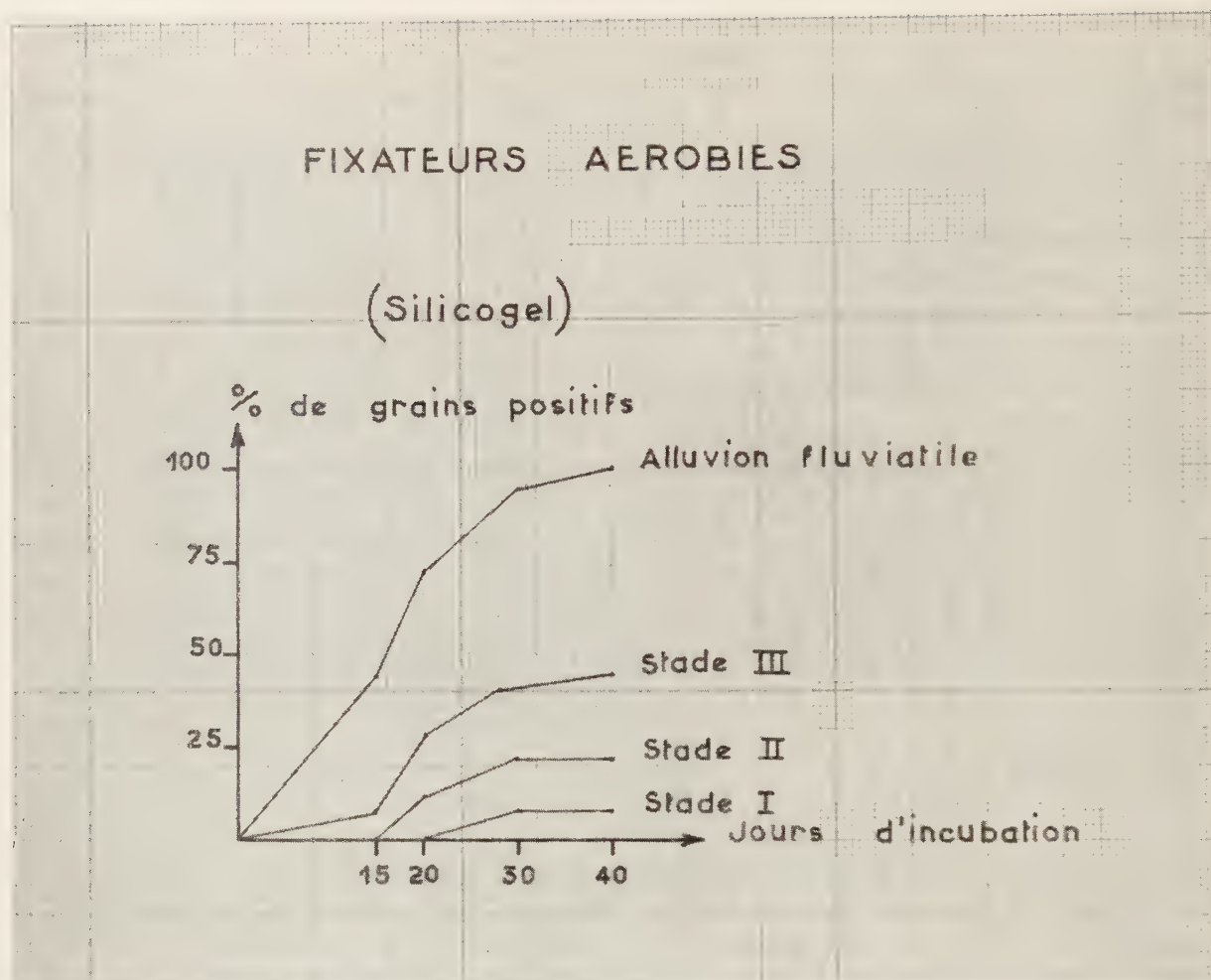


Figure 35

β') SUR MILIEU LIQUIDE (SUSPENSIONS - DILUTIONS)

|                           | Nombre de microbes<br>au bout de quinze jours d'étuve |
|---------------------------|-------------------------------------------------------|
| Stade I .....             | 0                                                     |
| Stade II .....            | 100                                                   |
| Stade III .....           | 100                                                   |
| Alluvion fluviatile ..... | 1.000                                                 |

Ces résultats confirment ceux donnés par la méthode précédente.

Si une symbiose entre *Beijerinckia* et cellulolytiques existe, comme celle signalée par POCHON entre *Azotobacters* et cellulolytiques, elle ne peut qu'avoir une faible importance étant donné le nombre réduit de *Beijerinckia*.

De plus, en supposant que les *Beijerinckia* se comportent comme les *Azotobacters*, qui selon POCHON synthétisent de l'humus, nous sommes assurés que ce mode de synthèse est réduit, toujours à cause du peu de prolifération des *Beijerinckia*. Cela n'empêche pas de trouver de forts pourcentages d'humus dans l'horizon de surface du stade II qui a donc une autre origine.



β) **FIXATEURS EN ATMOSPHERE PRIVEE D'OXYGENE** (fig. 36)

Ces courbes montrent que le développement des germes, qui sont des *Clostridium*, est plus rapide qu'en aérobose.

L'évolution entraîne, ici encore, une amélioration de l'activité microbienne. Le stade I conserve une très faible fixation. Cela est d'autant plus marqué que les germes anaérobies ont un rendement en azote fixé bien inférieur aux germes aérobie.

La fixation décroît très vite avec la profondeur des prélèvements.

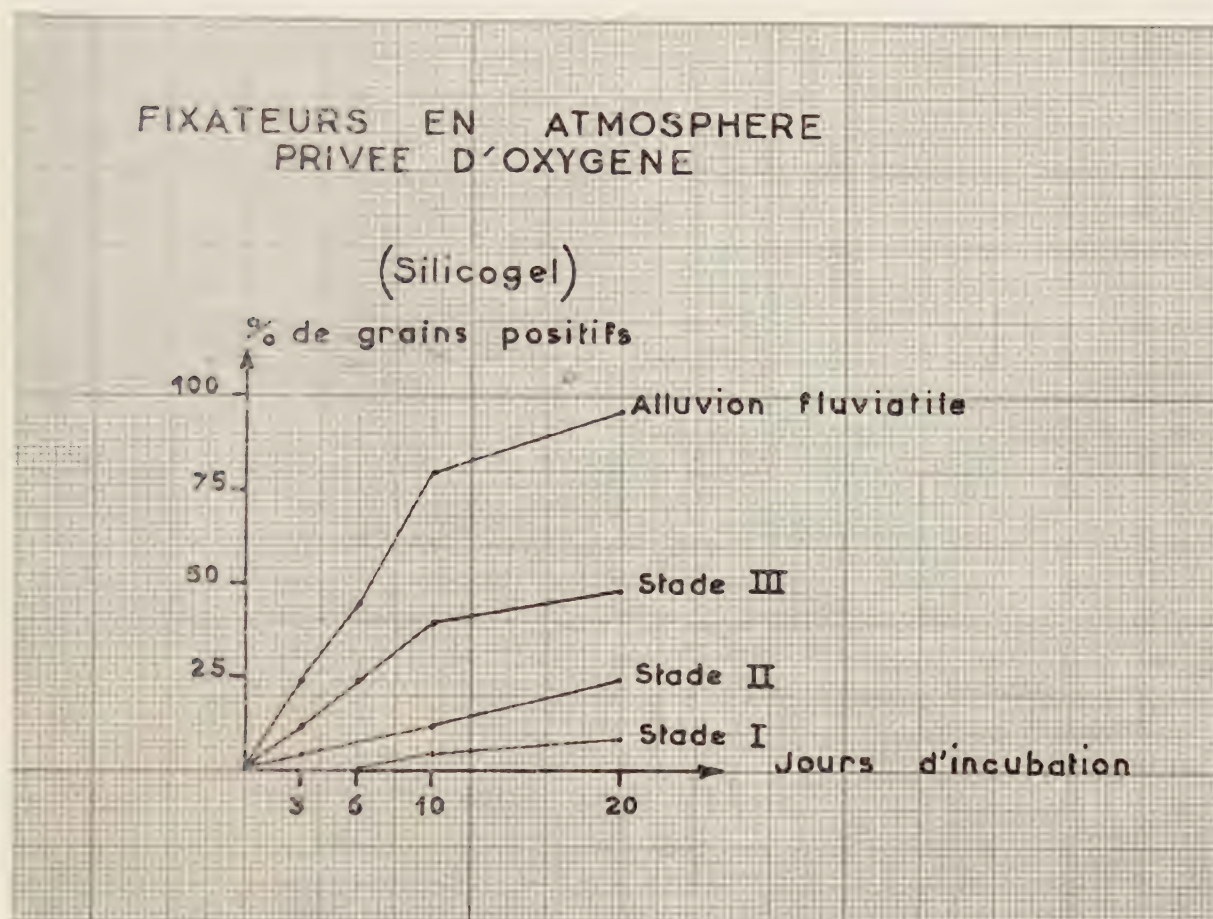


Figure 36

γ) **FIXATION GLOBALE**

L'évolution améliore la fixation de l'azote en surface des sols, mais celle-ci reste quand même peu active.

Le dépôt d'« alluvions fluviales » enrichit le sol en fixateurs.

c) **AMMONIFICATION** (fig. 37)

Ces courbes montrent que l'ammonification, très faible au stade I, s'améliore considérablement par drainage. Lorsque l'ammonification est active, elle favorise les germes hétérotrophes et indirectement ralentit les fixateurs d'azote.

L'ammonification décroît très fortement avec la profondeur des prélèvements.

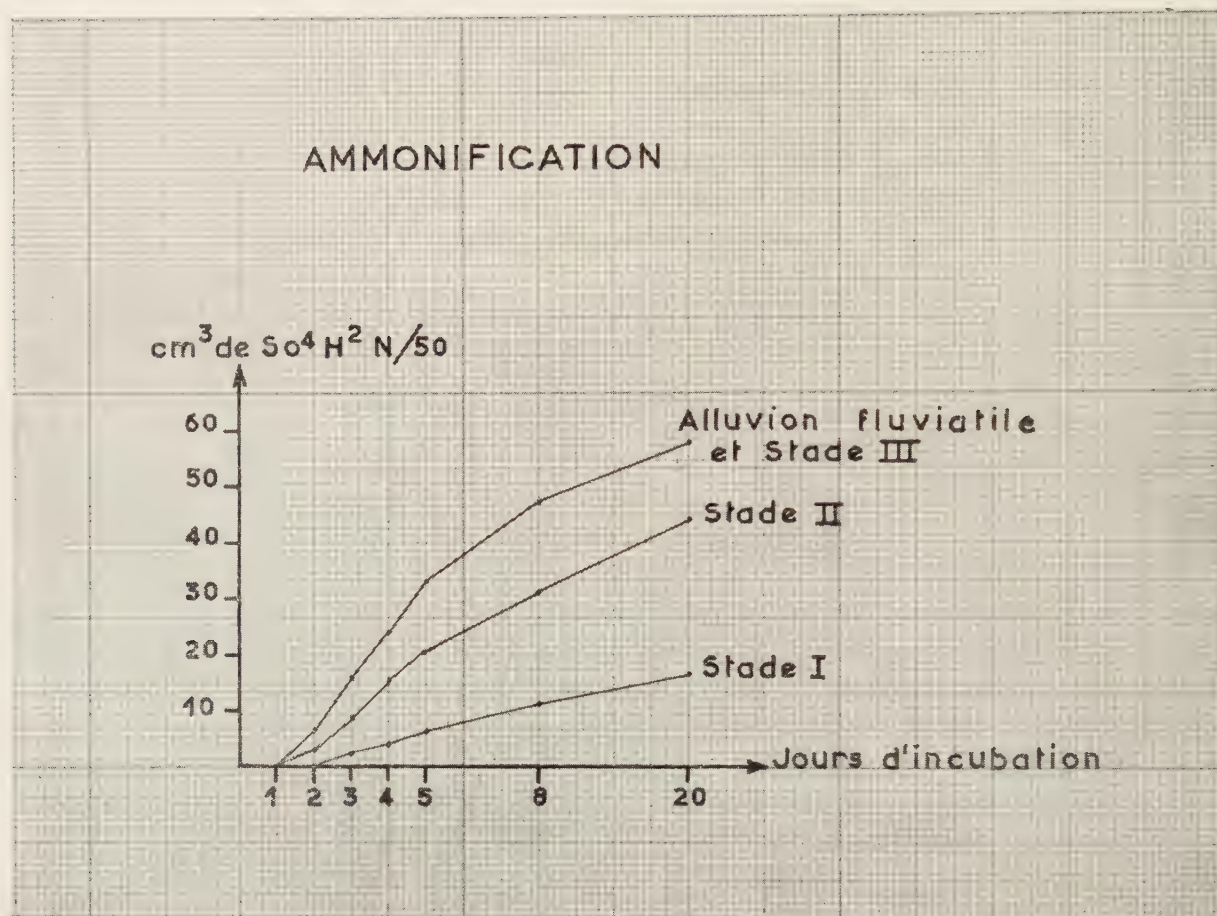


Figure 37

d) **NITRIFICATION**α) **VITESSE DE NITRIFICATION** (fig. 38)

L'évolution favorise la nitrification qui est presque nulle au stade I. Seuls les horizons de surface sont actifs.

β) **POUVOIR NITRIFICATEUR**

|                           | Pourcentages de tubes positifs au bout d'un mois d'incubation        |                                                                        |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
|                           | Germes nitreux<br>(ils transforment $\text{NH}_3$ en $\text{NO}_2$ ) | Germes nitriques<br>(ils transforment $\text{NO}_2$ en $\text{NO}_3$ ) |
| Stade I .....             | 12                                                                   | 10                                                                     |
| Stade II .....            | 38                                                                   | 48                                                                     |
| Stade III .....           | 64                                                                   | 60                                                                     |
| Alluvion fluviatile ..... | 65                                                                   | 96                                                                     |

Ces chiffres confirment les résultats exprimés par le graphique précédent. Au stade I, en plus de la mauvaise oxygénation et de l'ammonification très lente, le pouvoir nitrificateur est freiné par les températures peu élevées consécutives à l'humidité du sol qui ralentit son réchauffement. On sait, en effet, qu'une température de l'ordre de  $35^\circ$  favorise les nitrificateurs.



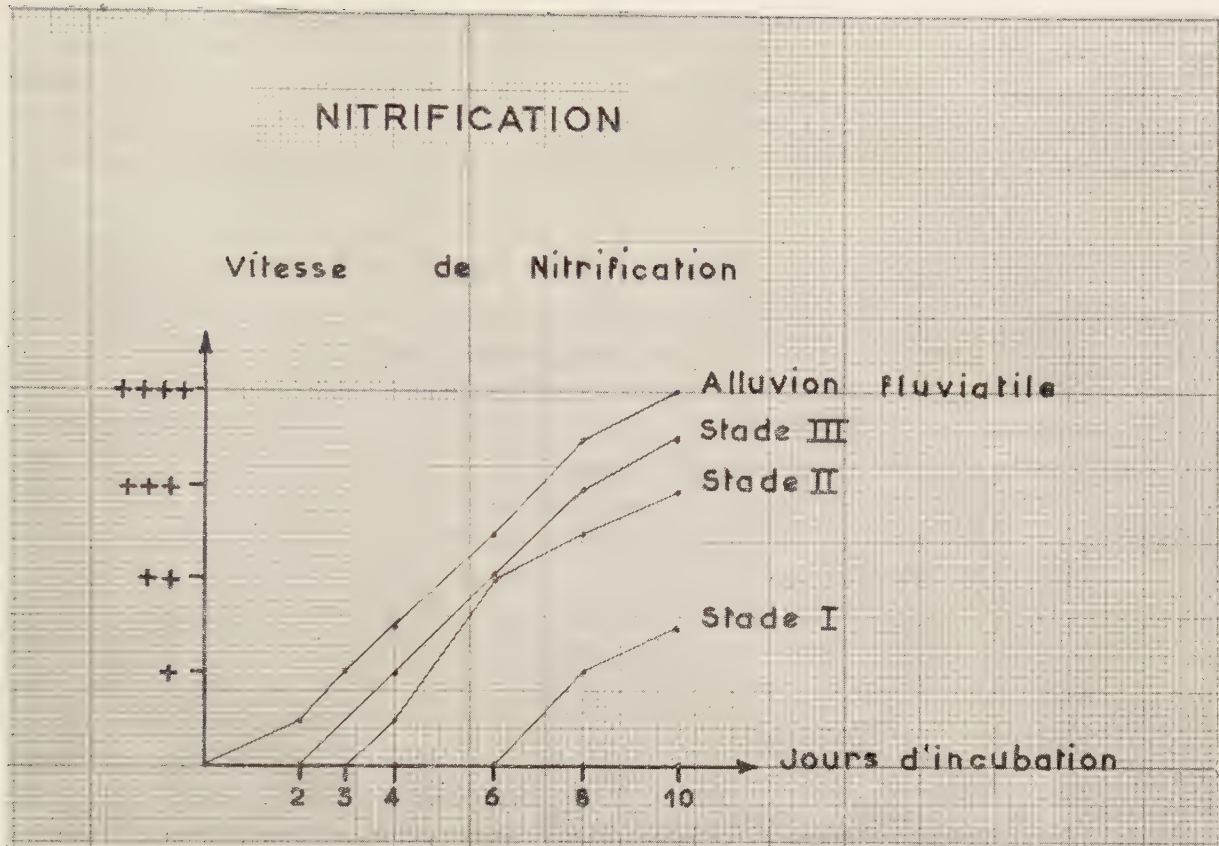


Figure 38

## e) HUMIVORES

Dans les divers stades évolutifs d'une tourbe drainée, nous avons mis en évidence des bactéries en bâtonnets et des *Actinomyces griseus*, responsables de la dégradation des acides humiques.

Leur développement trop lent et la technique de préparation du milieu de culture assez complexe ont limité le nombre de tests réalisés.

Il résulte de nos observations que le stade II semble être en surface le plus actif.

Il convient de retenir que, même en surface du stade I, il existe des organismes capables d'attaquer l'humus, mais que leur action, à tous les stades évolutifs, est lente.

La rapide disparition du stock d'humus entre le stade II et le stade III, en surface des sols, pousse à croire que ces organismes sont plus actifs dans les sols en place que dans les conditions offertes au cours des tests, ou bien qu'ils ne sont pas les seuls responsables de la dégradation de l'humus, ou encore qu'il existe une évolution abiologique.

Il importe de rappeler que l'humus peut être entraîné obliquement sous forme de complexe et que cet entraînement est particulièrement facile dans les stades évolués, placés topographiquement plus hauts que les stades non évolués.

C'est donc la somme des actions de formation, de dégradation et d'entraînement de l'humus qui est prise en considération en comparant les teneurs en humus des stades II et III.

## 3) INTERPRETATION DES ETUDES REALISEES PAR MOUREAUX

Les résultats obtenus par MOUREAUX, dans une étude destinée à mettre en évidence les variations saisonnières de l'activité microbienne, l'amènent à conclure : « Il apparaît que les variations, qui ne résulteraient que des saisons, sont très souvent perturbées par de nombreux facteurs, même en dehors des sols cultivés, si bien que pour chaque type de sol les variations restent essentiellement une donnée de l'expérience... l'activité biologique marque des pulsations, plus ou moins brusques, plus ou moins amples. »



Les courbes données par MOUREAUX peuvent, pour chaque échantillon de terre, se schématiser selon la fig. 39.

En traçant une droite horizontale partageant en deux parties sensiblement égales les dents de scies correspondant aux variations de l'activité microbienne au cours de l'année, nous avons, à l'intersection de cette droite et de l'ordonnée, une valeur X qui représente l'activité moyenne au cours de l'année.

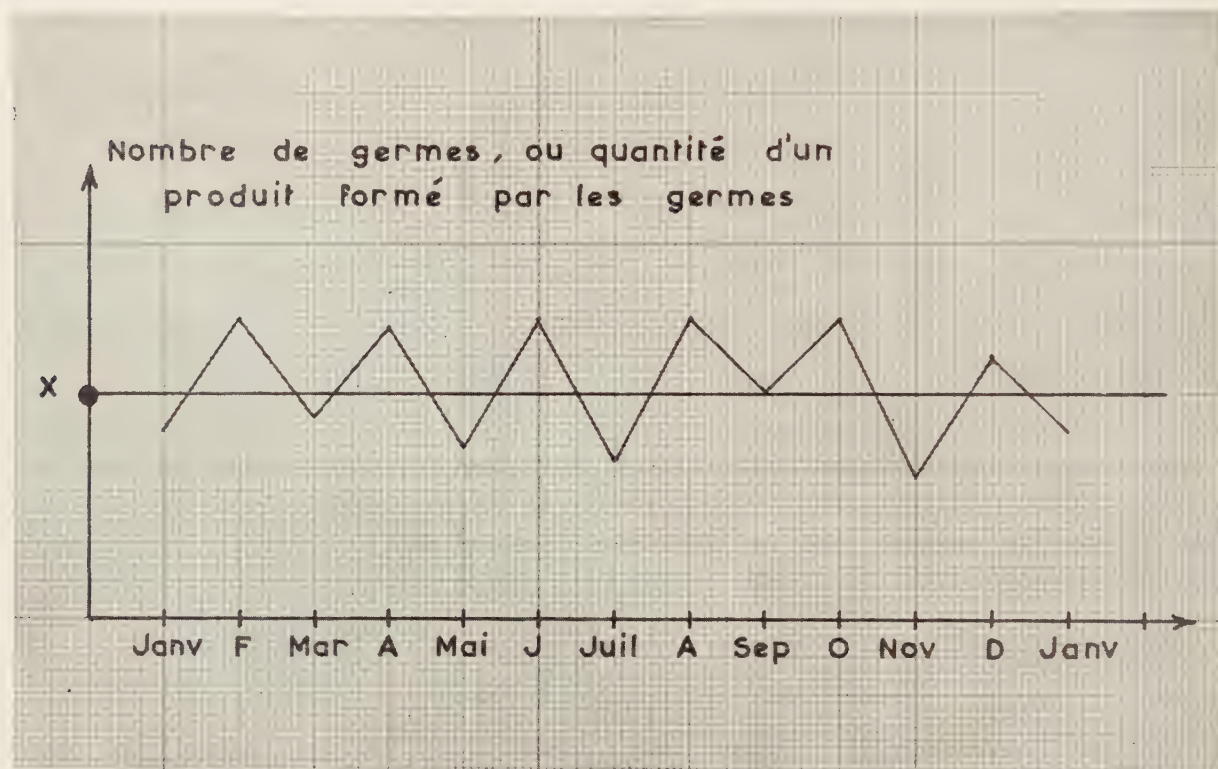


Figure 39

L'application de cette méthode conduit au tableau suivant :

| Nature du sol                                                             | Éléments organiques                             | Fixation d'azote                                                                | Nitrification                                                       |                                                                                                                                             | Activité globale                                |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|                                                                           | Matière organique totale exprimée en % de poids | Nombre de fixateurs aérobies cultivés à pH 6,7 contenus dans un gramme de terre | NO <sub>3</sub> existant dans le sol au moment du prélèvement (ppm) | NO <sub>3</sub> accumulé au bout de quatre semaines de séjour à l'étuve par un échantillon de terre maintenu à l'humidité équivalente (ppm) | CO <sub>2</sub> dégagé en mg pour 20 g de terre |
| Entre stades I et II, voisin du stade II .....                            | 34                                              | 25                                                                              | 6                                                                   | 60                                                                                                                                          | 14                                              |
| Proche du stade III .....                                                 | 13                                              | 200                                                                             | 8                                                                   | 60                                                                                                                                          | 17                                              |
| Ferrallitique de collines donnant par érosion l'« alluvion fluviatile » . | 5                                               | 1.900                                                                           | 2                                                                   | 8                                                                                                                                           | 12                                              |

Bien que MOUREAUX n'ait pas étudié de tourbe au stade I, les résultats qu'il obtient :

confirment la faible fixation aérobie, dans les sols peu évolués, et la richesse en fixateurs des « alluvions fluviatiles » provenant des sols ferrallitiques (le sens de ces variations serait renforcé avec une expression des résultats effectuée par rapport à une unité de volume) ;

confirment, lorsque nous faisons intervenir la notion de volume, l'accroissement de la nitrification, du stade II vers le stade III (les chiffres obtenus pour l'un et l'autre de ces stades sont élevés) ;

montrent que l'activité globale des micro-organismes, exprimée par rapport à un volume de sol, est déjà assez bonne à partir du stade II. Nous avons, en effet :

|                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| pour le stade II .....          | $14 \times 0,6 = 8,4$  |
| pour le stade III .....         | $17 \times 1 = 17$     |
| pour le sol ferrallitique ..... | $12 \times 1,4 = 16,8$ |

prouvent, enfin, que l'accroissement de la population microbienne par unité de volume de sol est nette du stade II vers le stade III.

#### 4) CONCLUSIONS BASEES SUR NOS RESULTATS ET SUR CEUX OBTENUS PAR MOUREAUX

Les tests concernant la cellulolyse montrent qu'au stade I les celluloses peuvent être décomposées par des germes anaérobies, mais l'attaque est lente.

L'évolution par drainage augmente l'activité des germes, qui devient bonne dès le stade II et qui est due aux actions successives de germes aérobies et anaérobies.

La fixation d'azote atmosphérique, presque nulle au stade I, s'améliore progressivement par évolution du profil, mais n'atteint jamais des valeurs élevées.

L'ammonification, très faible au stade I, s'intensifie considérablement lorsque le sol évolue. Elle est déjà bonne au stade II.

La nitrification suit les variations de l'ammonification, dont elle dépend.

L'activité globale des micro-organismes devient assez bonne à partir du stade II. Elle croît encore nettement entre ce stade et le stade III.

**En résumé**, le drainage entraîne en surface d'un sol tourbeux un accroissement progressif de l'activité des micro-organismes. Si le stade I est particulièrement peu actif, le stade II par contre, qui présente nous l'avons vu de bons caractères chimiques concernant les éléments organiques, est déjà, en surface, le siège d'une forte activité microbienne.

Dans tous les stades évolutifs, le nombre de germes diminue très rapidement avec la profondeur.

Tout dépôt d'« alluvion fluviale », enrichit le sol en germes cellulolytiques, fixateurs, ammonifiants et nitrificateurs.

#### 5) EXPERIENCE EN CASES LYSIMETRIQUES

Les résultats qui précèdent sont obtenus sur des sols en place soumis à des conditions pédo-climatiques déterminées par l'intensité du drainage et par conséquent différentes d'un stade à l'autre.

Nous avons pensé qu'en plaçant l'horizon de surface des stades II et III dans des conditions pédo-climatiques semblables, pendant un temps prolongé, cela suffirait à donner des résultats concernant les activités microbiennes différents de ceux que nous venons de commenter.

Nous avons donc rempli des cases lysimétriques, à drainage contrôlé, placées en un même lieu géographique soit avec l'horizon de surface du stade II, soit avec l'horizon de surface du stade III. Nous avons ainsi constitué deux sols que nous avons soumis à la culture du riz pendant deux années consécutives (même durée d'ennoyage annuel de l'ordre de cinq mois).

Deux ans sont nettement insuffisants pour modifier les horizons au point de les faire passer d'un stade évolutif à un autre.

Au début de la mise à sec suivant la deuxième culture, les prélèvements ont fourni les résultats suivants :

| Nature du test                                                                                                   | Stade II    | Stade III          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|
| Cellulolyse aérobie sur silicogel (résultats en % de grains positifs au bout de trente jours d'incubation) ..... | 72          | 52                 |
| Cellulolyse anaérobie en tubes scellés (quarante jours d'incubation) .....                                       | +++         | ++                 |
| Fixations aérobie et anaérobie sur silicogel .....                                                               | Assez bonne | Un peu plus faible |

Ces quelques tests montrent qu'une meilleure oxygénation de l'horizon de surface du sol au stade II lui confère, pour certains germes, une activité plus grande que celle de l'horizon de surface du sol au stade III. Il y a donc non seulement la nature de l'horizon, mais les antécédents pédoclimatiques qui interviennent pour définir l'activité microbienne. Ces antécédents influencent en premier lieu les micro-organismes, avant de se traduire par des modifications de morphologie du profil.

#### 6) RESUME D'ENSEMBLE

L'évolution par drainage favorise l'activité microbienne des tourbes qui est déjà bonne au stade II.

L'activité est liée non seulement à l'état d'évolution des tourbes qui, de ce fait, constituent un matériel plus ou moins favorable au développement des germes, mais aussi aux conditions pédoclimatiques qui ont précédé les tests.

#### 4) CARACTERES DU COMPLEXE ABSORBANT

Il est fait à nouveau appel au mode de représentation graphique utilisé dans l'étude relative aux éléments organiques\*.

##### a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS (fig. 40)

##### α) VARIATIONS ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS D'UN PROFIL TOURBEUX SOUMIS AU DRAINAGE

L'évolution entraîne pour tous les horizons du profil une chute de la capacité d'échange totale, particulièrement marquée entre les stades II et III. Il y a une similitude entre les courbes relatives à la capacité d'échange et celles se rapportant aux teneurs en humus, exprimées par rapport à une unité de poids\*\*. Cela montre que la capacité d'échange est avant tout fonction des colloïdes organiques.

Ce résultat n'est pas surprenant, même en sachant que les taux d'argiles augmentent par évolution, puisque nous avons à faire à une kaolinite qui a une faible capacité d'échange et que, comme nous le montrerons par la suite, la nature des argiles ne change pas lorsqu'une tourbe perd son hydromorphie par drainage.

La somme des bases échangeables varie dans le même sens que la capacité d'échange totale.

Les quelques valeurs qui suivent permettent de fixer la répartition des diverses bases dans le complexe absorbant :

au stade I, on obtient en surface :

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| CaO en mé/100 g .....               | 3   |
| MgO en mé/100 g .....               | 2   |
| K <sub>2</sub> O en mé/100 g .....  | 0,7 |
| Na <sub>2</sub> O en mé/100 g ..... | 0,3 |
| Total .....                         | 6   |

ces valeurs changent peu dans les autres horizons organiques du stade I et dans l'ensemble des horizons organiques du stade II ;

pour l'horizon de surface du stade III, les chiffres suivant sont obtenus :

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| CaO en mé/100 g .....               | 1,4 |
| MgO en mé/100 g .....               | 0,9 |
| K <sub>2</sub> O en mé/100 g .....  | 0,1 |
| Na <sub>2</sub> O en mé/100 g ..... | 0,1 |
| Total .....                         | 2,5 |

ainsi, à tous les stades, CaO est l'élément dominant, viennent ensuite MgO, puis K<sub>2</sub>O et enfin Na<sub>2</sub>O. La somme de ces éléments est toujours faible quel que soit l'état d'évolution du profil.

$$S \times 100$$

Le taux de saturation du complexe ( $\frac{\quad}{T}$ ) varie peu. En effet, lorsque la capacité

d'échange totale diminue, par évolution, la somme des bases échangeables baisse également. Il faut ici évoquer les lessivages obliques et les exportations par les cultures.

\* Voir page 73.

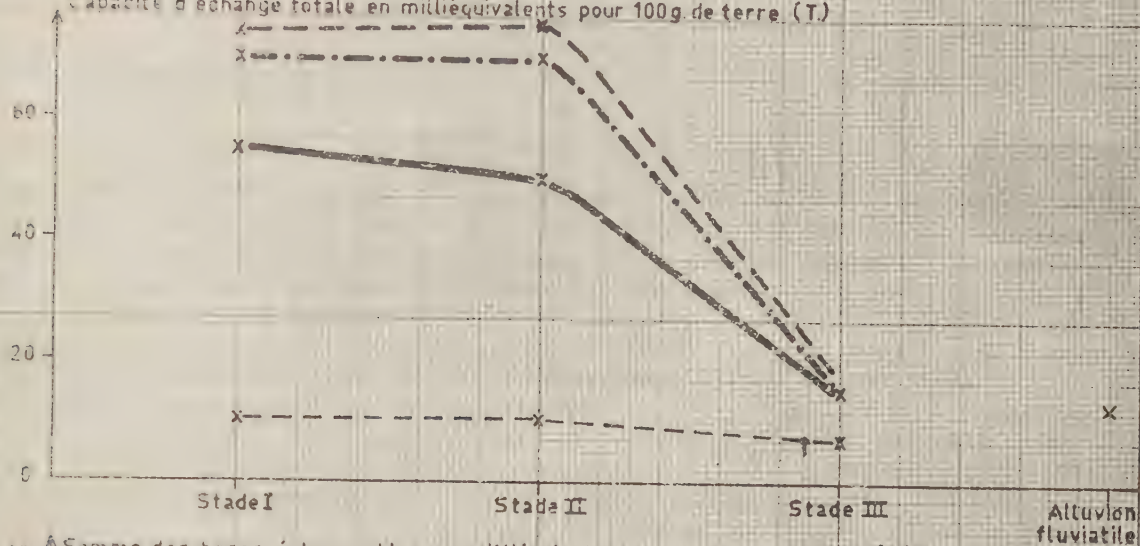
\*\* Voir figures 30 bis, 30 ter et 30 quater.



COMPLEXE ABSORBANT EXPRIMÉ PAR RAPPORT A UN  
POIDS DE TERRE SÉCHÉE A 105°

- Horizon organique de surface.
- • — Horizon organique intermédiaire.
- - - Horizon organique profond.
- - - Horizon non organique.

Capacité d'échange totale en milliéquivalents pour 100g. de terre (T)



Somme des bases échangeables en milliéquivalents pour 100g. de terre (S)

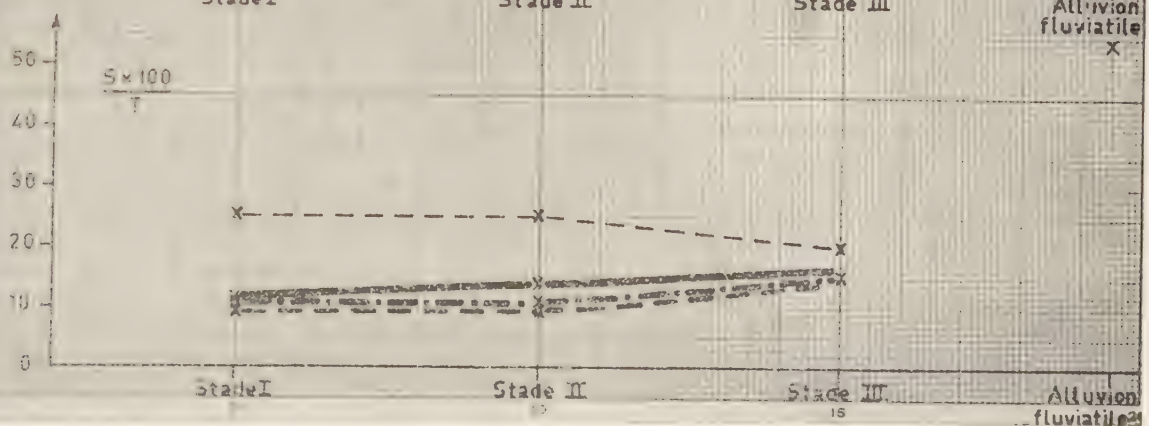
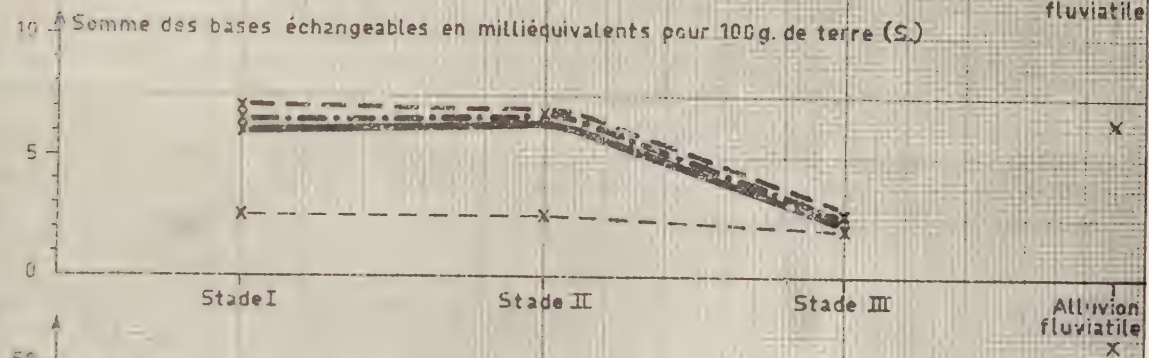


Figure 40

Au stade III, une légère augmentation de S suffit pour accroître sensiblement le taux de saturation. C'est ce qui se produit lorsqu'un dépôt d'« alluvion fluvatile » assez riche en bases recouvre la surface du sol puis est mélangé à l'horizon de surface par labour.

β) VARIATIONS AU SEIN DE PROFILS CORRESPONDANT A DES STADES D'EVOLUTION PLUS OU MOINS AVANCES

La capacité d'échange totale est plus élevée dans les horizons organiques profonds que dans l'horizon organique de surface. Les horizons non organiques, pauvres en humus, ont une faible capacité d'échange.

La somme des bases échangeables varie peu entre les divers horizons organiques. Elle est, par contre, plus basse dans le gley.

Les taux de saturation sont assez constants dans les horizons organiques. Les valeurs les plus fortes correspondent au gley.

b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME (fig. 41)

Nous ne donnons pas à nouveau les courbes relatives aux densités apparentes qui figurent dans l'étude concernant les éléments organiques \*.

α) VARIATIONS ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS D'UN PROFIL TOURBEUX SOUMIS AU DRAINAGE

L'influence des densités a pour effet de rapprocher les diverses courbes entre elles, c'est-à-dire de tendre à une homogénéisation des valeurs. Ce résultat est particulièrement net en ce qui concerne la somme des bases échangeables.

Le stade II présente les valeurs les plus fortes de la capacité d'échange totale. Il y a là une analogie avec les courbes relatives aux teneurs en humus, exprimées par rapport à une unité de volume \*\*.

β) VARIATIONS AU SEIN DE PROFILS CORRESPONDANT A DES STADES D'EVOLUTION PLUS OU MOINS AVANCES

Les horizons organiques conservent une meilleure capacité d'échange totale que le gley. Ce sont les horizons organiques profonds qui présentent les valeurs les plus fortes.

La somme des bases échangeables varie peu en profondeur du profil.

Nous pouvons résumer ainsi les résultats exprimés par rapport à une unité de volume :

la valeur de la capacité d'échange totale suit les variations des teneurs en humus, exprimées par rapport à une unité de volume. L'évolution entraîne une amélioration de cette capacité qui atteint un maximum au stade II, quel que soit l'horizon pris en considération, puis une décroissance ;

la somme des bases échangeables varie peu avec l'évolution et avec la profondeur des prélèvements. Elle a partout des valeurs faibles ;

le taux de saturation du complexe est assez stable lorsque l'hydromorphie décroît. C'est le gley qui présente les valeurs les moins basses. A tous les stades et pour tous les horizons, les sols tourbeux évoluant par drainage sont très désaturés ;

tout dépôt d'« alluvion fluvatile » augmente la somme des bases échangeables et le taux de saturation du complexe.

## 5) ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE

Avant de passer à l'étude des bases totales et de l'acide phosphorique total, donnons quelques indications sur les valeurs de l'acide phosphorique assimilable :

des dosages réalisés suivant la méthode TRUOG mettent en évidence le  $P_2O_5$  lié au Ca et donnent de très faibles résultats (des valeurs de l'ordre de 0,1 ‰ g de  $P_2O_5$  sont courantes) ;

d'autres dosages suivant la méthode SAUNDER, qui utilise la soude pour extractif et met en évidence le  $P_2O_5$  lié au fer et à l'alumine, donnent des résultats plus élevés (beaucoup de chiffres sont compris entre 0,20 et 0,80 ‰ g de  $P_2O_5$ ).

\* Voir figure 31.

\*\* Voir figure 31 bis.

Par suite de variations assez importantes dans les taux obtenus, pour des horizons analogues, placés dans des profils ayant atteint le même stade évolutif, les modifications consécutives au drainage sont difficiles à préciser. Il apparaît que l'évolution d'un profil tourbeux n'entraîne pas de grands bouleversements dans les teneurs en acide phosphorique assimilable exprimées par rapport à une unité de volume.

Dans l'ensemble, à tous les stades, les sols sont peu pourvus en  $P_2O_5$  assimilable.

## 6) BASES TOTALES

### a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS (fig. 42)

#### $\alpha$ ) VARIATIONS ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS D'UN PROFIL TOURBEUX SOUMIS AU DRAINAGE

L'évolution entraîne pour tous les horizons une diminution de  $CaO$ ,  $MgO$  et  $K_2O$ . La chute est particulièrement nette en surface du sol.

#### $\beta$ ) VARIATIONS AU SEIN DE PROFILS CORRESPONDANT A DES STADES D'EVOLUTION PLUS OU MOINS AVANCES

Les horizons organiques sont toujours plus riches que le gley. Les valeurs les plus fortes sont obtenues dans l'horizon de surface du stade I.

### b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME (fig. 43)

#### $\alpha$ ) VARIATIONS ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS D'UN PROFIL TOURBEUX SOUMIS AU DRAINAGE

La prise en considération des densités inverse le sens de la variation des valeurs des bases totales dans les horizons organiques. Il y a donc une tendance à l'augmentation progressive des teneurs en bases par drainage.

Dans le gley, l'évolution, qui ne modifie guère la densité, provoque une baisse des bases totales explicable par les lessivages et les exportations consécutives aux cultures.

Dans les horizons organiques, les augmentations de densité voilent les appauvrissements de même nature que ceux observés dans le gley.

Pour donner un ordre de grandeur des exportations, citons les chiffres fournis par ANGLADETTE qui considère qu'une tonne de paddy récolté exporte en moyenne :

|     |   |     |                  |
|-----|---|-----|------------------|
| 10  | à | 15  | kg de N,         |
| 4   | à | 8   | kg de $P_2O_5$ , |
| 2   | à | 4   | kg de $K_2O$ ,   |
| 0,2 | à | 0,6 | kg de $CaO$ ,    |
| 1   | à | 3   | kg de $MgO$ .    |

Les rizières malgaches produisant généralement de 1,5 t à 3 t de paddy par hectare, les exportations doivent être compensées par fumure, sous peine de voir les rendements s'abaisser.

A partir du stade III, l'évolution ne modifie plus les densités, ce qui fait que la décroissance des bases est progressive lorsqu'il n'y a pas fumure. L'apport d'« alluvion fluviale » s'oppose à cette chute.

#### $\beta$ ) VARIATIONS AU SEIN DE PROFILS CORRESPONDANT A DES STADES D'EVOLUTION PLUS OU MOINS AVANCES

Le gley est plus riche en bases que les horizons organiques dans les stades peu évolués.

Les résultats obtenus par rapport à une unité de volume peuvent être ainsi résumés :

l'évolution a tendance à accroître légèrement la valeur moyenne des bases totales dans les horizons organiques ;

le gley a plus de réserves que les horizons organiques, dans les stades peu évolués ;

l'ensemble des profils étudiés est pauvre en bases. Tout apport d'« alluvion fluviale » entraîne un enrichissement sensible.

## 7) ACIDE PHOSPHORIQUE TOTAL (fig. 44)

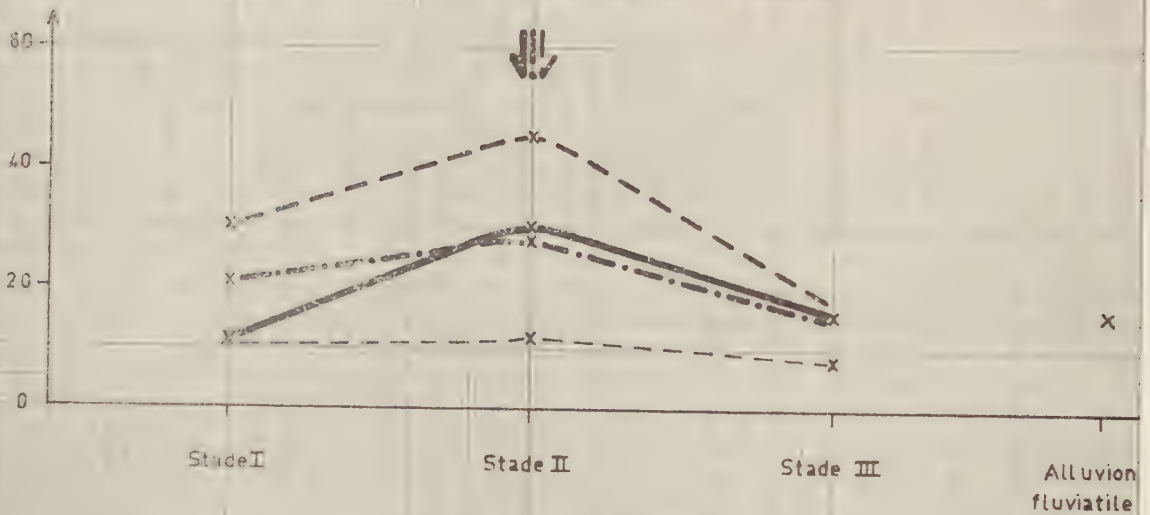
Les variations concernant  $P_2O_5$  total suivent celles qui viennent d'être énoncées pour les bases totales, quel que soit le mode d'expression. Elles sont toujours de faible importance.

Les sols tourbeux, plus ou moins évolués, présentent peu de  $P_2O_5$  total par unité de volume et les « alluvions fluviales » sont nettement plus riches qu'eux en cet élément.



COMPLEXE ABSORBANT EXPRIMÉ PAR RAPPORT  
A UN VOLUME DE SOL HUMIDE.

Capacité d'échange totale en milliéquivalents pour  $100\text{cm}^3$  de sol (T)



Somme des bases échangeables en milliéquivalents pour  $100\text{cm}^3$  de sol (S)

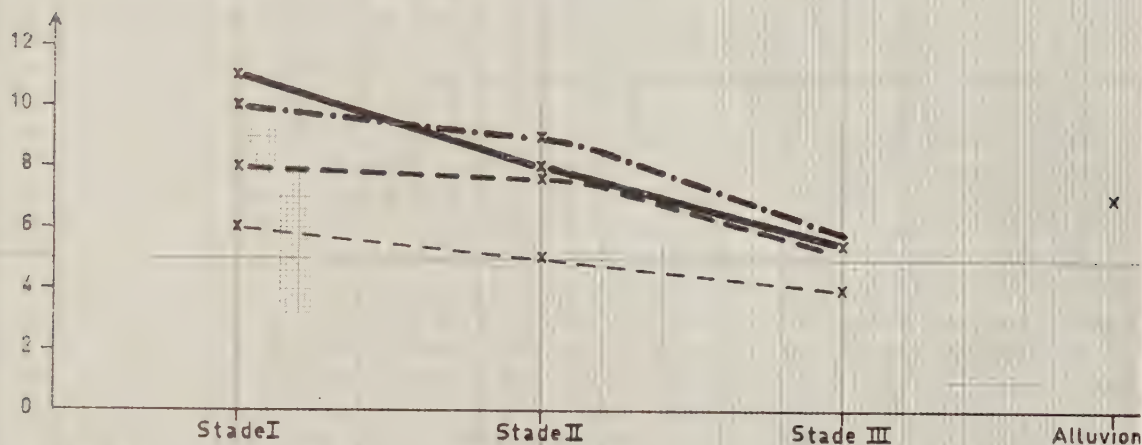


Figure 41

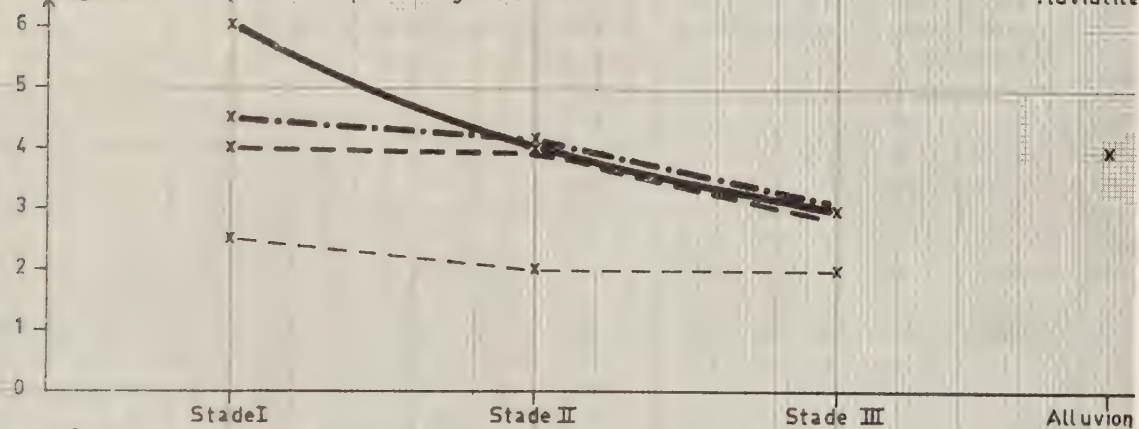
# BASES TOTALES EXPRIMÉES PAR RAPPORT A UN POIDS.

- Horizon organique de surface.
- · - Horizon organique intermédiaire.
- - - Horizon organique profond.
- - - Horizon non organique.

CaO en milliéquivalents pour 100g. de terre.



MgO en milliéquivalents pour 100g. de terre.



K<sup>2</sup>O en milliéquivalents pour 100g. de terre.

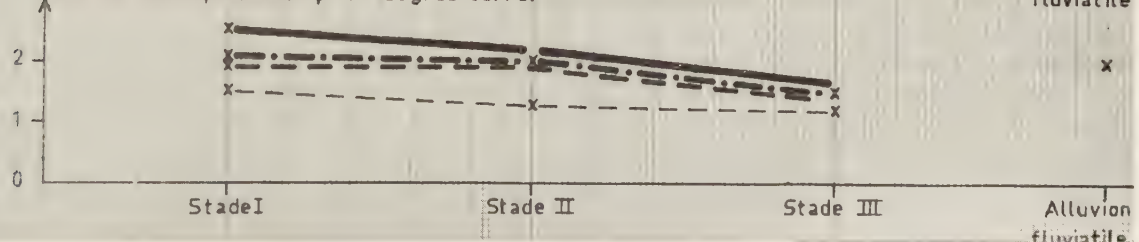


Figure 42

# BASES TOTALES EXPRIMÉES PAR RAPPORT A UN VOLUME.

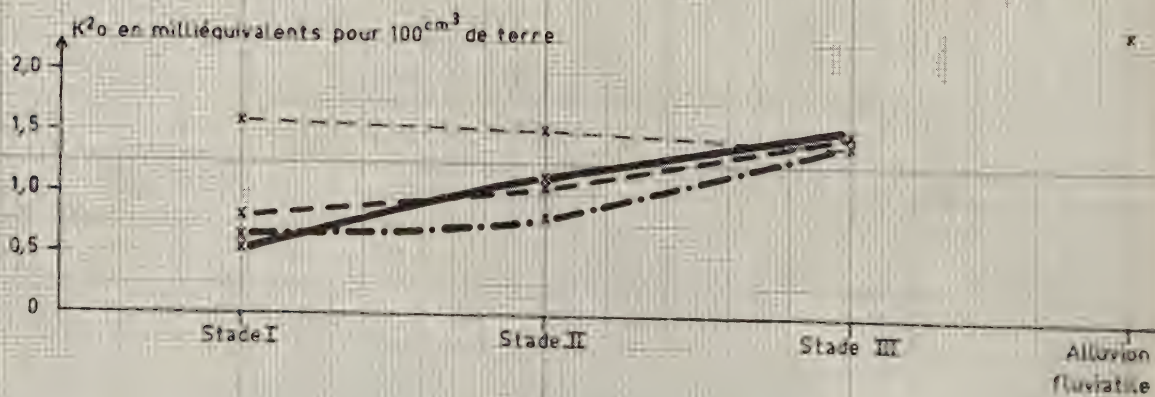
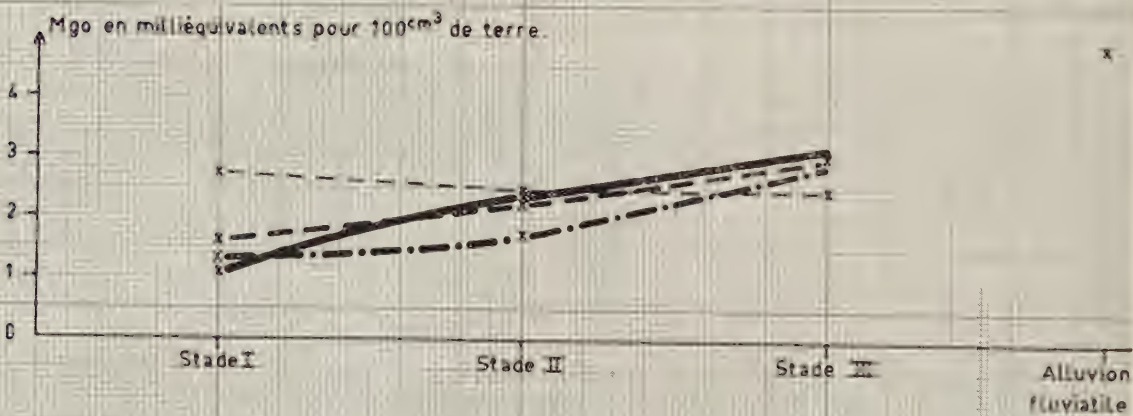


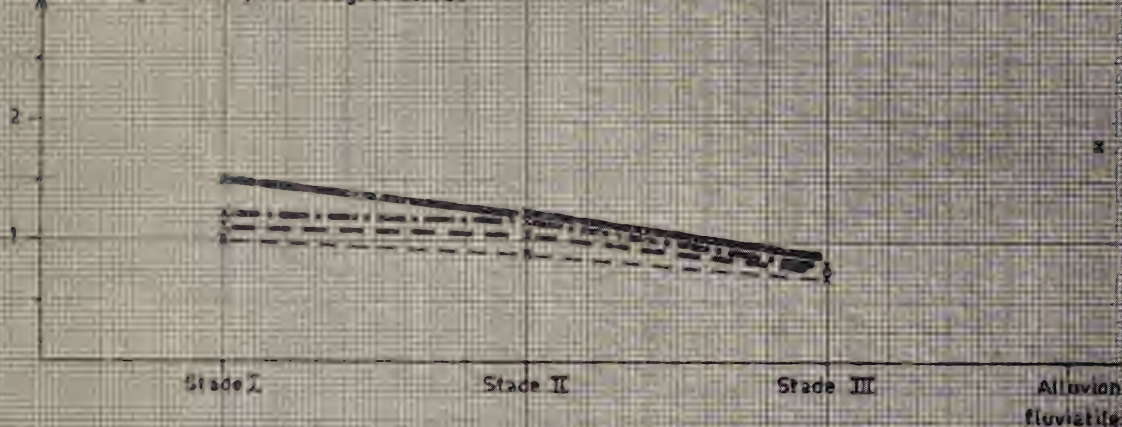
Figure 43



# $P^{20}_5$ TOTAL EXPRIMÉ PAR RAPPORT A UN POIDS

- Horizon organique de surface.
- Horizon organique intermédiaire.
- Horizon organique profond.
- Horizon non organique.

$P^{20}_5$  en grammes pour 1000g. de terre.



# $P^{20}_5$ TOTAL EXPRIMÉ PAR RAPPORT A UN VOLUME

$P^{20}_5$  en grammes pour 1000<sup>cm</sup><sup>3</sup> de terre.

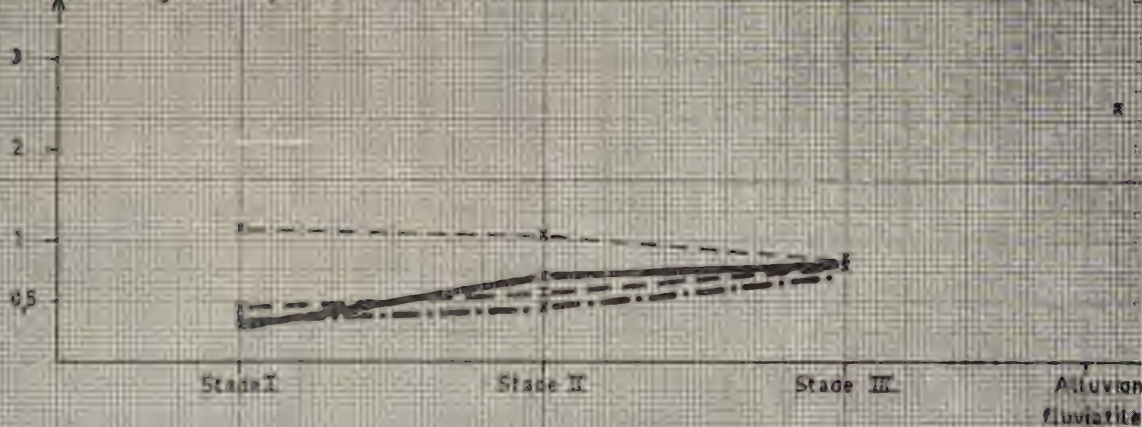


Figure 44

## 8) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

### a) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN POIDS

L'évolution entraîne une augmentation du pH de l'ordre d'une unité.

Le pouvoir tampon diminue considérablement par drainage des tourbes.

Aux stades I et II, les horizons organiques ont tous un pouvoir tampon très élevé, alors qu'au stade III l'horizon organique est peu tamponné.

Pour l'ensemble des profils, le gley est moins tamponné que les horizons organiques.

### b) EXPRESSION PAR RAPPORT A UN VOLUME

Les courbes (fig. 45) donnent les pH à l'eau à leur intersection avec l'axe des abscisses et figurent les pouvoirs tampons. Elles conduisent aux conclusions suivantes :

L'évolution provoque une légère augmentation des pH de l'ordre de 0,5 à 1 unité. A tous les stades, les profils sont franchement acides ;

lorsque les taux de matière organique totale sont élevés, que cette matière organique n'est pas fibreuse, le pouvoir tampon atteint les plus fortes valeurs (c'est ce que nous constatons au stade II).

**En résumé**, les variations de l'acidité des sols étant faibles, elles ne constituent pas un caractère fondamental de différenciation des divers stades évolutifs.

Par contre, le pouvoir tampon exprimé par unité de volume de sol croît puis décroît dans les horizons organiques, au cours de leur évolution. Le stade II apparaît comme étant le plus tamponné.

## 9) NATURE MINERALOGIQUE DES ARGILES

Rappelons que les horizons organiques d'un sol tourbeux non drainé, placé sur les Hauts-Plateaux malgaches, ont une fraction minérale inférieure à 2  $\mu$  comportant :

75 % de kaolinite,  
5 % de gibbsite.

De plus, il existe, en quantité parfois assez abondante, des gels amorphes riches en fer.

Rappelons aussi que l'horizon de gley de ce même profil présente des résultats analogues, à la différence qu'il possède très peu de gels.

Dans les horizons organiques d'une tourbe au stade II, les gels amorphes sont encore abondants et les pourcentages de kaolinite et de gibbsite restent sensiblement les mêmes que dans une tourbe évoluée.

Une tourbe ayant atteint et même dépassé le stade III donne les résultats mentionnés sur la figure 46, qui montrent que la composition minéralogique demeure encore la même en ce qui concerne la kaolinite et la gibbsite mais que les gels amorphes ont disparu de la partie superficielle du sol.

**En conclusion**, la nature des argiles n'est pas modifiée par drainage d'un sol tourbeux.

## 10) FER

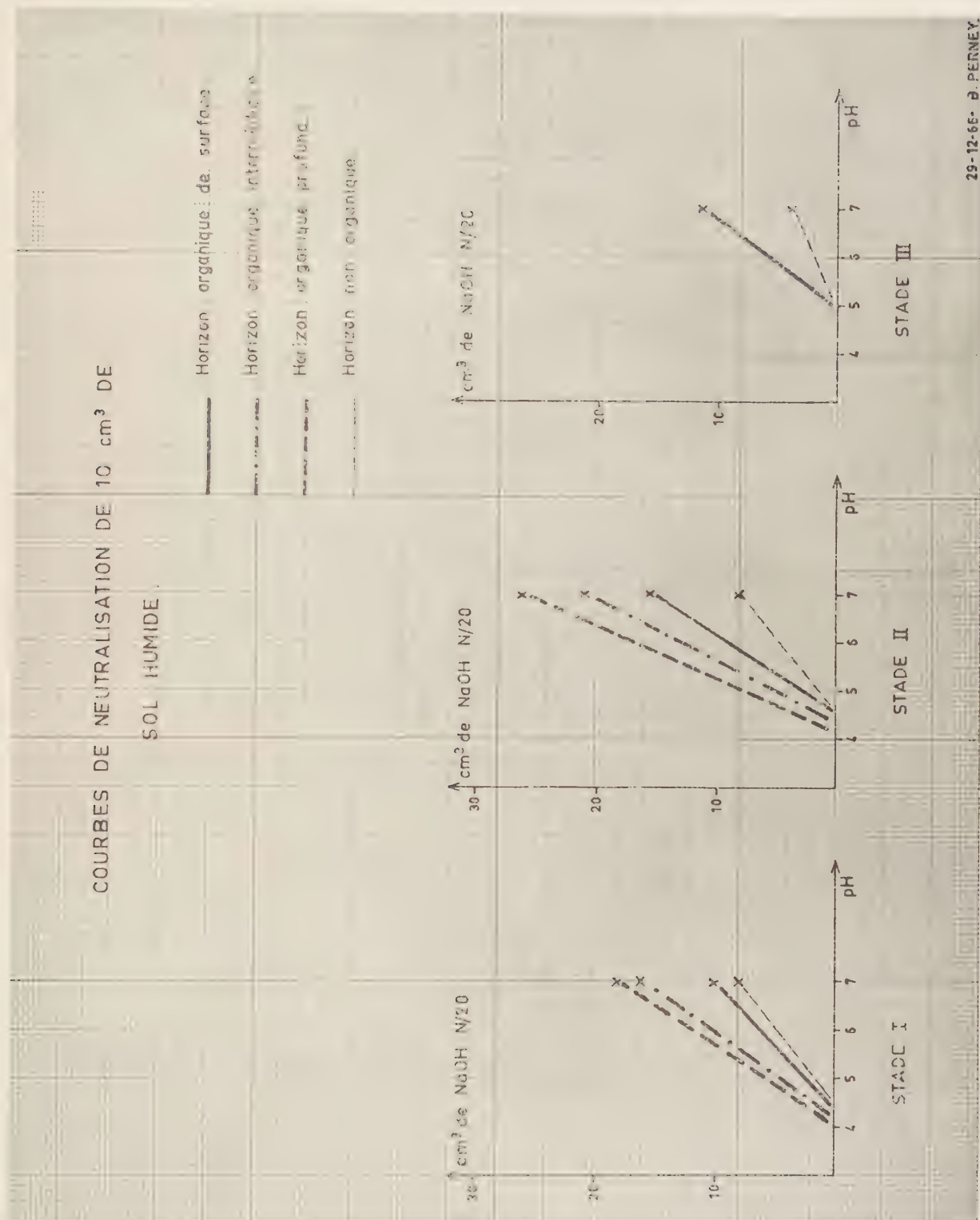
### a) FER LIBRE

Nous avons signalé dans le premier chapitre qu'au stade I la fraction minérale des horizons tourbeux possède 1 à 2 % de fer libre, les chiffres étant obtenus en suivant la méthode DEB et l'expression des résultats se réalisant par rapport à un poids (la densité apparente de cette fraction minérale est voisine de 1).

Nous avons aussi indiqué que, dans le gley, ces valeurs ont tendance à baisser légèrement. Enfin, nous avons souligné que les matières exclusivement d'origine végétale ne possèdent que quelques centigrammes de fer pour 100 g de matières sèches.

Ainsi, les horizons organiques ayant une forte dominance en poids de matières végétales, très pauvres en fer, et un faible pourcentage de matières minérales, peu riches en fer, sont globalement pauvres en fer. Cette faible teneur est encore plus marquée lorsque les résultats sont donnés par rapport à une unité de volume puisque plus le sol est organique et plus sa densité est faible.







## Rayons X

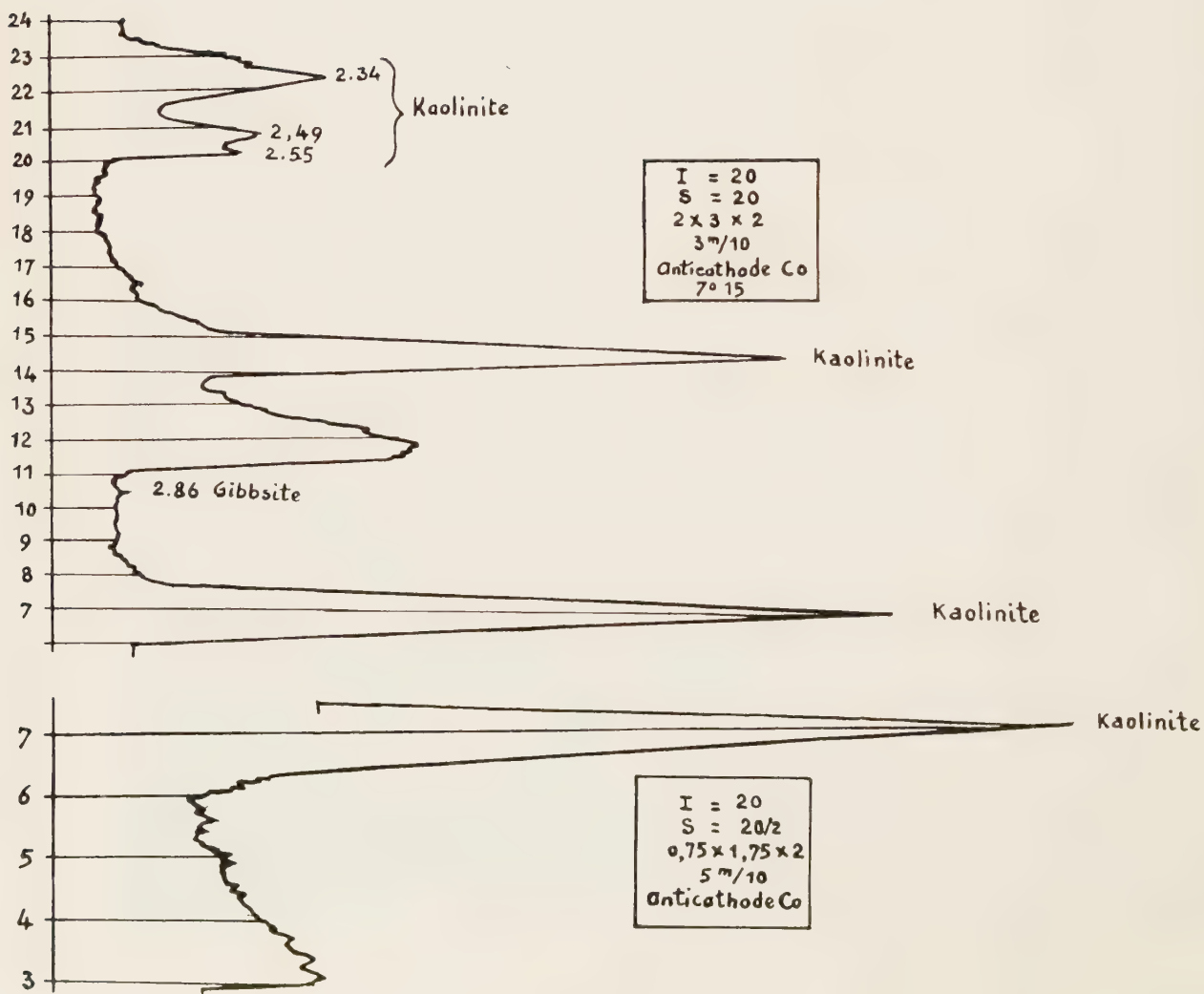
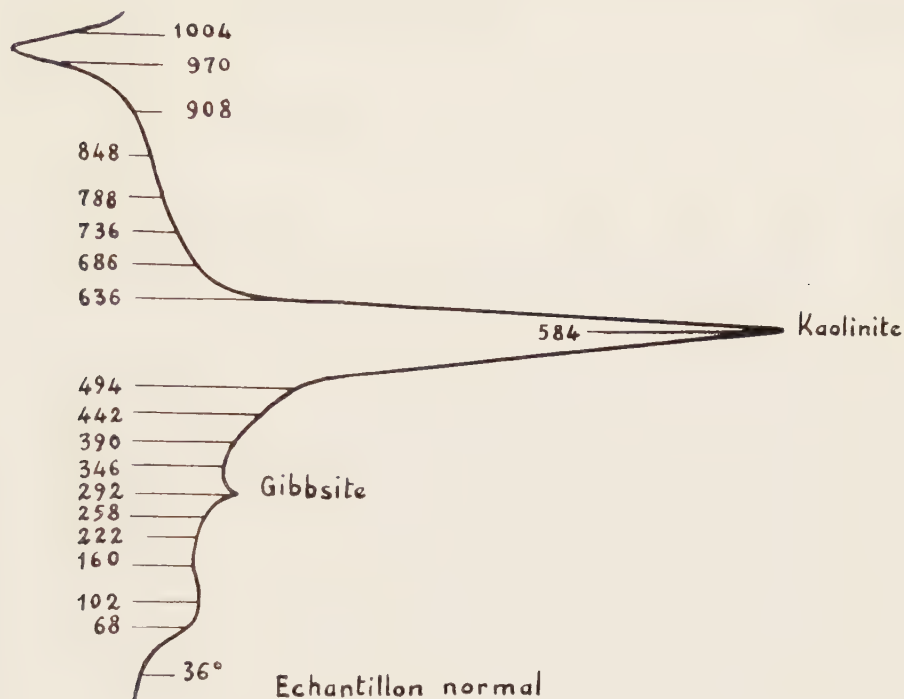


Figure 46

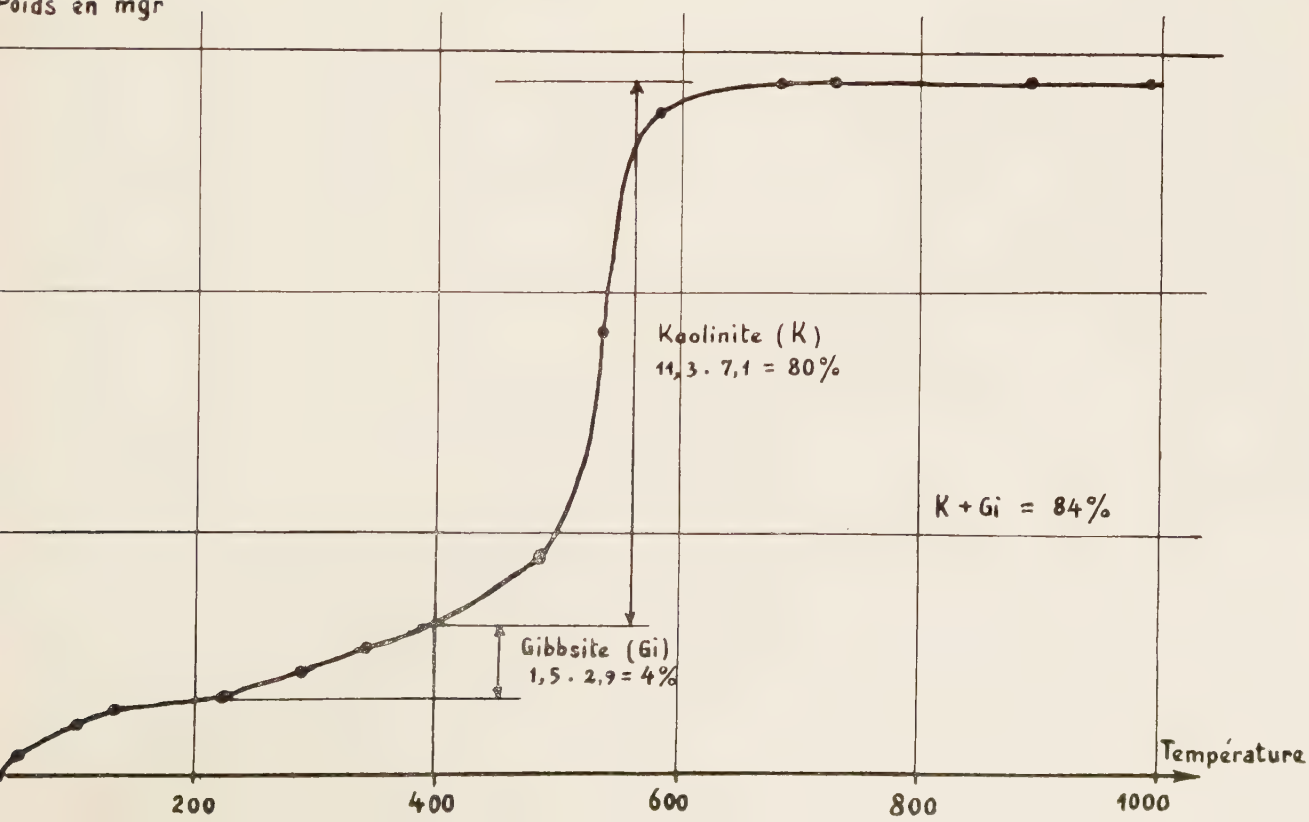
izon organique

## Thermique différentielle



## Thermobalance

Poids en mgr



Les horizons non organiques (gley) sont moins pauvres en fer que les horizons organiques, surtout lorsque l'expression des résultats se réalise par rapport à un volume de sol. Comparées à celles des sols ferrallitiques, leurs teneurs sont quand même basses.

Au stade II, des complexes fer-matières organiques, analogues à ceux signalés dans le chapitre I, sont abondants dans les canaux de drainage (fig. 47 et 47 bis). De plus, il existe un entraînement oblique du fer sous forme soluble.

Le départ de fer est voilé, dans le cas d'une expression des résultats par rapport à une unité de volume, par le jeu des augmentations des densités. Le tassement des sols amortissant les abaissments des taux de fer consécutifs aux entraînements fait que la plante trouve toujours, dans le volume exploité par ses racines, cet élément en quantité suffisante pour éviter toute chlorose ferrique.

Au stade III, les entraînements du fer dans les eaux de drainage continuent à se manifester, mais moins intensément qu'au stade précédent. Ici, l'apport en surface d'« alluvions fluviales » riches en fer (7 % de fer libre exprimé en poids) couvrent les pertes.

#### b) FER TOTAL

La variation des teneurs est parallèle à celle obtenue pour le fer libre.

#### c) FER DECELABLE A L'ANALYSE MINERALOGIQUE

Les études minéralogiques de la fraction inférieure à  $2\ \mu$  des tourbes évoluées et non alluvionnées ne mettent en évidence ni fer sous forme cristallisée, ni fer à l'état de gel.

**En résumé**, le fer, qui est peu abondant dans les tourbes, aussi bien dans les horizons de gley que dans les horizons organiques et qui se présente essentiellement sous forme de gels, s'élimine peu à peu obliquement lorsque le profil évolue par drainage (formes solubles et pseudosolubles). Cet appauvrissement actif dans les horizons organiques est masqué par les augmentations de la densité apparente et par les dépôts d'« alluvions fluviales » riches en fer.

Lorsque le sol au stade III n'est pas trop pauvre en fer, il se produit, dans l'ancien gley et l'horizon organique, des taches rouille et jaunes qui peuvent durcir lorsque le sol se dessèche.

Les sols tourbeux parfaitement drainés depuis longtemps ont des tons gris blanc en séchant s'ils ont perdu la quasi-totalité de leur fer. Dans le cas contraire, ils prennent des tons jaunes passant peu à peu au rouge par oxydation.

### 11) RAPPORT SILICE/ALUMINE

Au cours de l'évolution par drainage, ce rapport reste toujours nettement inférieur à 2. L'aluminium se maintient sur place bien que les pH soient parfois à peine supérieurs à 4.

Dans la fraction minérale des horizons organiques à divers stades évolutifs, ainsi que dans le gley, l'alumine correspond à 40 ou 50 % du poids de l'échantillon.

Les matières végétales possèdent encore moins d'alumine que de fer. Aussi, plus un horizon sera riche en matières végétales, plus ses taux d'alumine, exprimés par rapport à la somme des matières organiques et minérales, seront faibles.

RIQUIER a observé, dans des tourbes évoluées, des phénomènes de toxicité et il pense que les excès d'alumine en sont la cause.

### 12) CARACTERES PHYSIQUES CONCERNANT LES RELATIONS SOL/EAU

On donnera en premier lieu les courbes de pF relatives aux horizons suivants :

horizon de racines grossières, horizon de débris de racines et horizon riche en matières organiques fines qui appartiennent tous trois au stade I\* ;

puis horizon organique de surface composé de fins débris organiques appartenant au stade II ;

enfin horizon organique et horizon non organique appartenant tous deux au stade III. qui suffiront à mettre en évidence les variations des valeurs de l'eau utile, au cours de l'évolution.

On calculera ensuite, pour les exemples choisis, les réserves en eau.

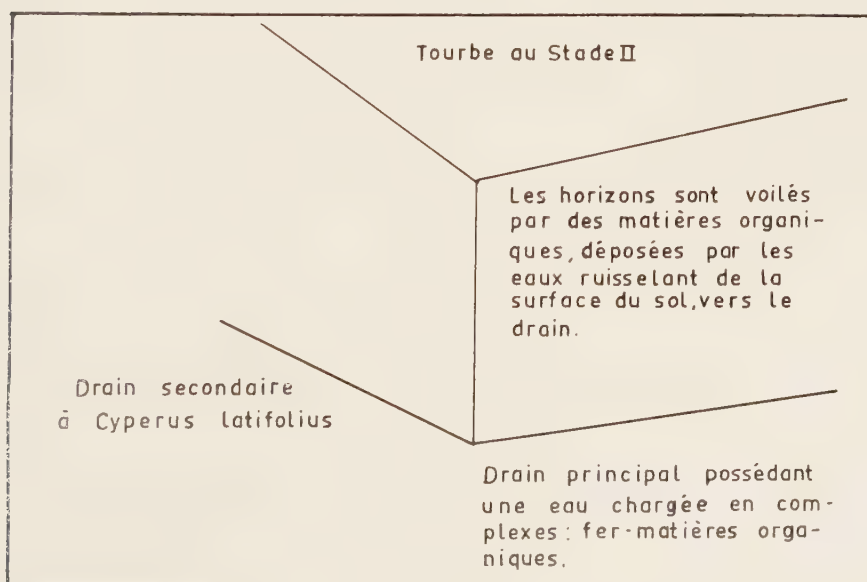
\* Voir figure 24.



Fig. 47 et 47 bis

ENTRAÎNEMENT PAR L'EAU DE LA MATIÈRE ORGANIQUE ET DU FER  
DANS UNE TOURBE AU STADE II

(Lac Alaotra)



Les caractères de perméabilité qui jouent un rôle essentiel sur le mouillage des terres en profondeur et sur leur ressuyage seront précisés.

Les plasticités, interférant grandement sur les travaux de labour, seront enfin évaluées.

Les caractères physiques, concernant les relations sol-eau ne sont pas négligeables, même en riziculture. La réserve en eau qui paraît secondaire, puisque le sol est noyé, ne l'est pas toujours. En effet, les irrigations étant parfois défailtantes, il arrive que les terres placées aux extrémités des canaux reçoivent si peu d'eau que seules les réserves du sol évitent des chutes considérables du rendement.

#### a) COURBES DE pF ET EAU UTILE

Ces courbes correspondent à la valeur de l'humidité retenue dans un échantillon saturé d'eau, puis soumis à une certaine pression (16 kg pour le pF 4,2, maintenue pendant deux jours ; 10 kg pour pF 4 ; 4 kg pour pF 3,6 ; 1 kg pour pF 3 et 1/3 de kg pour pF 2,5).

Les mesures réalisées à la presse à membrane et à la chambre à dépression sont contrôlées pour pF 3 par la méthode de centrifugation à 1.000 g et pour pF 2,5 par la méthode de succion à la trompe à vide, sur filtre de GOOCH.

Les prélèvements d'échantillons ont lieu vers la fin de la saison des pluies. De cette manière, le sol vient de subir, dans les conditions naturelles, une longue période d'humectation.

Pour chaque horizon, trois prélèvements sont réalisés à l'aide de cylindres métalliques :

l'un de ces prélèvements est immédiatement mis à tremper dans l'eau au laboratoire, pendant une semaine ;

l'autre est séché à l'air, puis gorgé d'eau pendant une semaine ;

le troisième est séché à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant, puis gorgé d'eau pendant une semaine.

Après ces traitements, les humidités aux divers pF sont déterminées. Trois courbes de pF sont ainsi obtenues sur des échantillons à structure non remaniée. Elles permettent de calculer l'eau utile en utilisant soit les humidités à pF 3, soit les humidités à pF 2,5.

L'eau utile est, dans les graphiques qui suivent, exprimée en grammes pour cent grammes de l'échantillon séché à l'étuve à 105°.

Voici les conclusions à tirer de ces résultats en passant successivement en revue les divers stades évolutifs.

#### a) STADE I (fig. 48, 48 bis et 48 ter)

L'horizon de racines grossières, non préalablement séché, présente, si l'on considère que la capacité de rétention pour l'eau au champ correspond à l'humidité à pF 3, 100 % d'eau utile. Si l'on adopte l'humidité à pF 2,5, on a 138 % d'eau utile. Il semble qu'il convient de choisir pF 2,5 puisque, dans certains tourbes, les Hollandais prennent jusqu'à pF 1,9.

De toutes manières, que le pF retenu soit 3 ou 2,5, la valeur de l'eau utile est élevée. De plus, l'échantillon amené au point de flétrissement permanent des végétaux (pF 4,2) possède encore 100 % d'eau.

Lorsque les racines grossières ont été séchées à l'air, leur réhumectation est difficile ; il en résulte un décalage de la courbe des pF entraînant une baisse des réserves en eau.

Si la dessiccation se réalise plus intensément dans une étuve, le phénomène est encore plus marqué.

Les états antérieurs d'humectation de l'horizon influencent donc ses aptitudes à la rétention de l'eau.

Après un engorgement prolongé, les influences antérieures s'estompent et les courbes se regroupent. Le délai d'engorgement pour effacer les traces de déshydratations antérieures est de plusieurs mois.

L'horizon constitué de débris organiques présente des humidités plus élevées aux différents pF que l'horizon précédent et les valeurs obtenues pour l'eau utile de l'horizon non préalablement déshydraté sont de 150 % avec pF 3 et 200 % avec pF 2,5.

Le rôle des dessiccations préalables reste le même.

L'horizon riche en matières organiques fines, non préalablement déshydraté, a des valeurs en eau utile comprises entre celles obtenues pour les deux horizons précédents : 125 % avec pF 3 et 163 % avec pF 2,5.

La dessiccation préalable entraîne une réhumectation particulièrement difficile. Il se produit en effet des agrégats polyédriques, ayant environ 0,3 cm d'arête, à faces lisses et brillantes, composés d'un mélange intime de matières organiques fines et d'argile, qui sont imperméables. Au bout de trois ans de séchage à l'air, une réhumectation de deux semaines n'a donné que 12 % d'eau utile en prenant l'humidité à pF 3. Il y a là une irréversibilité qu'il convient de ne pas négliger lors de la mise en valeur des tourbes par drainage. Un assèchement progressif semble diminuer cet effet.

L'horizon de gley a les caractères de l'horizon non organique du profil au stade III.

#### β) STADE II (fig. 49)

L'horizon de surface présente des valeurs de l'humidité, bien moins élevées que celles correspondant aux horizons organiques du stade précédent.

Les dessiccations préalables ont une action moins marquée.

Pour les autres horizons, les valeurs sont celles des horizons du stade I qui ont la même nature.

#### γ) STADE III (fig. 50 et 50 bis)

L'horizon de surface donne des courbes proches de celles obtenues pour les sols non hydromorphes voisins du marais.

L'eau utile qui, compte tenu de la richesse de l'échantillon en argile et en limon, doit être calculée à partir des valeurs de pF 3, est de 22 %.

Les dessiccations influencent peu les résultats.

L'horizon non organique présente les valeurs les moins élevées en eau utile et subit peu l'influence de déshydratations préalables.

Les « alluvions fluviales » ont des caractères très voisins de cet horizon non organique.

**En résumé**, plus les horizons sont riches en matières organiques assez désagrégées, plus l'eau utile est abondante. Elle atteint des valeurs de l'ordre de 200 g pour 100 g de l'échantillon séché à l'air dans l'horizon de débris organiques du stade I.

Dans les horizons organiques, le point de flétrissement est atteint pour des teneurs en eau encore élevées.

#### b) RESERVE EN EAU DES SOLS

Elle est calculée par rapport à un volume de sol, d'après la formule générale suivante :

$$\text{Réserve en eau} = R = 10 \cdot H \cdot d \cdot (\text{Eau utile})$$

dans laquelle :

$H$  = profondeur du sol en mètre,

$d$  = densité apparente,

10 = coefficient pour avoir  $R$  en millimètres d'eau.

En calculant la réserve en eau pour une épaisseur de 0,10 m de sol, la formule se simplifie ainsi :

$$R = d \cdot (\text{Eau utile}).$$

L'application de cette formule générale est délicate dans le cas des horizons très organiques puisque la densité apparente varie avec l'état d'hydratation. Elle est, en effet, plus forte au point de flétrissement (pF 4,2) qu'à la capacité de rétention (pF 2,5). Il convient donc mieux d'adopter :

$$R = (d_1 \times \text{humidité à pF 2,5}) - (d_2 \times \text{humidité à pF 4,2})$$

dans laquelle :

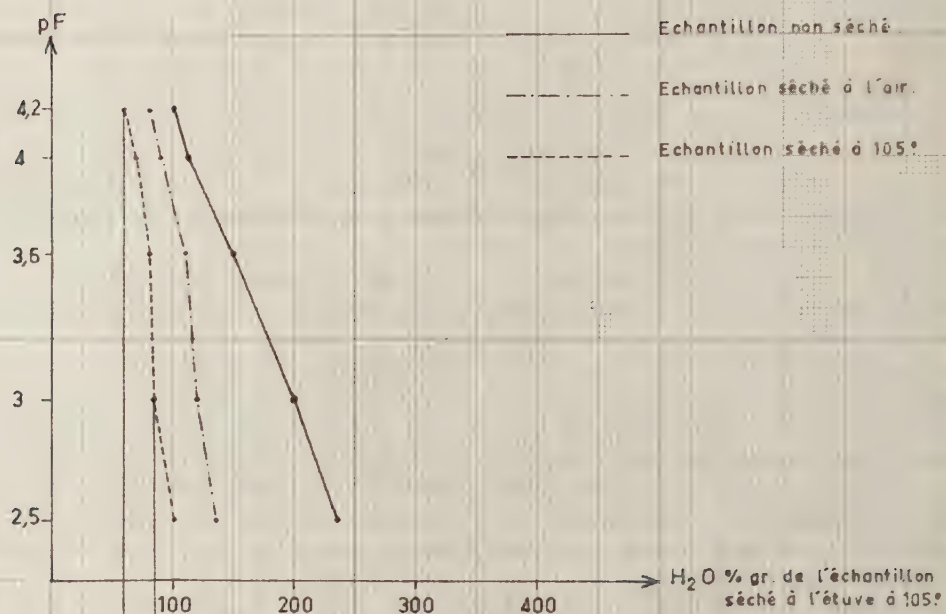
$d_1$  = densité apparente, à la capacité de rétention ;

$d_2$  = densité apparente, au point de flétrissement.

De cette manière, le produit ( $d_2 \times \text{humidité à pF 4,2}$ ) augmente et la valeur de  $R$  diminue par rapport à celle de  $R$  calculée par la formule  $R = d \cdot (\text{Eau utile})$ , dans laquelle  $d$  est la densité du sol humide.



# STADE I RACINES GROSSIERES



Eau utile  
en gr. pour  
cent gr.  
d'échantillon  
sec.

Humidité à pF 3 — Humidité à pF 4,2

EU = 25%

EU = 40%

EU = 100%

Eau utile  
en gr. pour  
cent gr.  
d'échantillon  
sec.

Humidité à pF 2,5 — Humidité à pF 4,2

EU = 40%

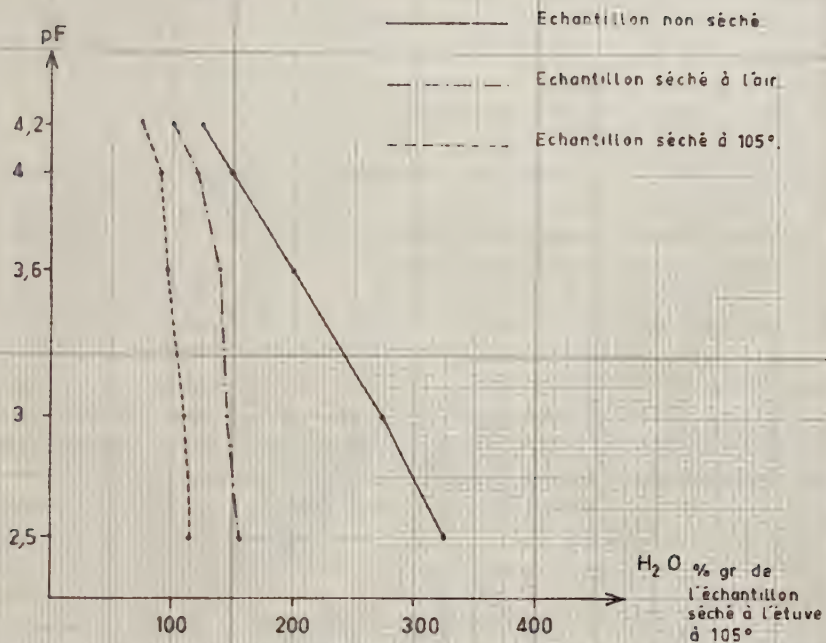
EU = 55%

EU = 138%

4-1-67. B. PERNEY.

Figure 48

# STADE I DEBRIS ORGANIQUES



$$\text{Eau utile en gr par cent gr d'échantillon sec} = \frac{\text{Humidité à pF 3} - \text{Humidité à pF 4,2}}{\text{EU} = 35\%}$$

$$\text{EU} = 50\%$$

$$\text{EU} = 150\%$$

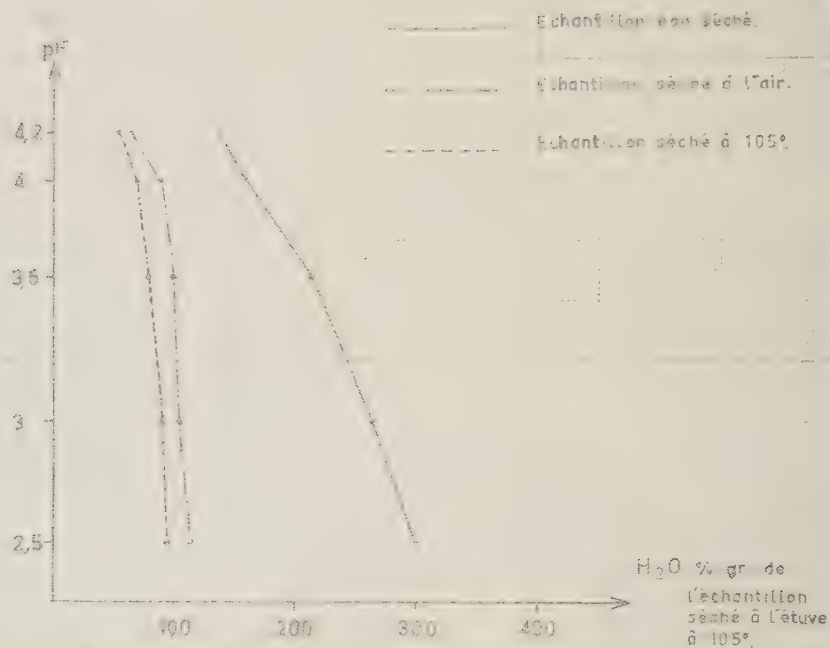
$$\text{Eau utile en gr par cent gr d'échantillon sec} = \frac{\text{Humidité à pF 2,5} - \text{Humidité à pF 4,2}}{\text{EU} = 40\%}$$

$$\text{EU} = 55\%$$

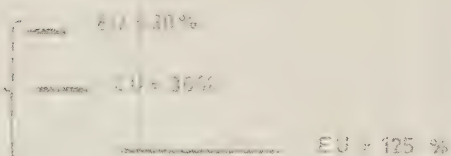
$$\text{EU} = 200\%$$

Figure 48 bis

# STADE I MATERIEES ORGANIQUES 1971



Eau utile en gr.  
pour cent gr. d'échantillon sec. = Humidité à pH 3 — Humidité à pH 6,2



Eau utile en gr.  
pour cent gr. d'échantillon sec. = Humidité à pH 2,5 — Humidité à pH 6,2

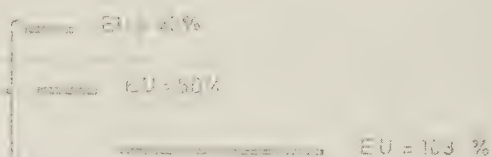
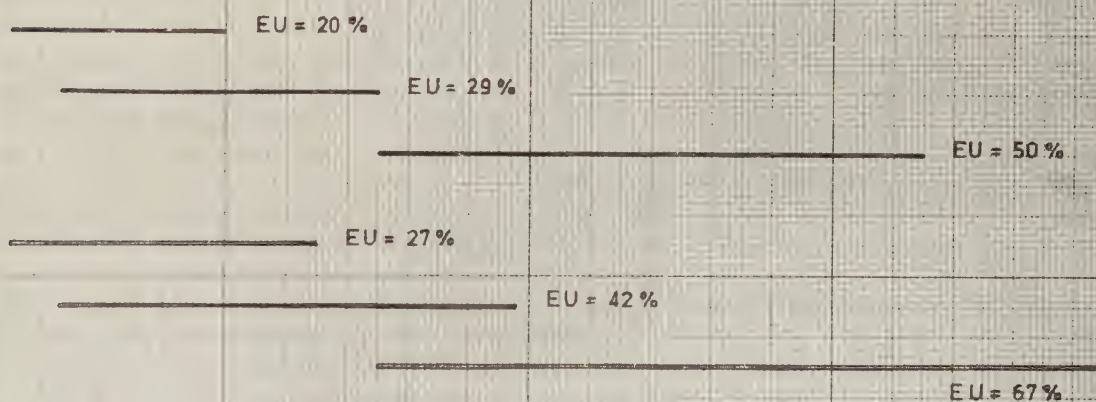
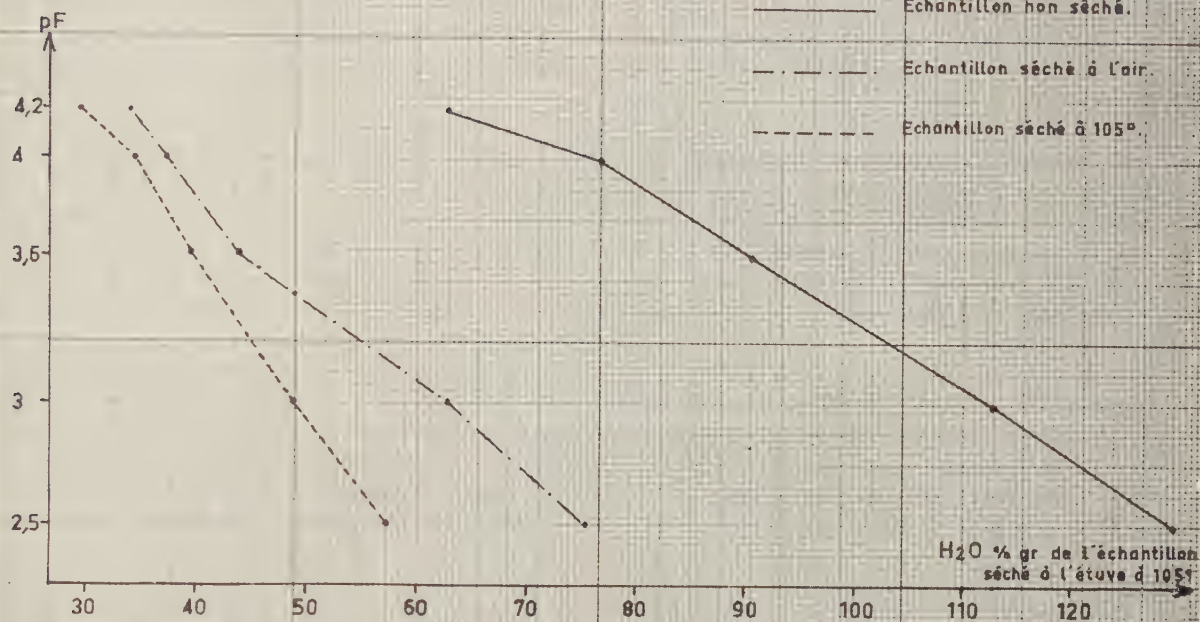


Figure 48 ter



# STADE II HORIZON DE SURFACE



REMARQUE: L'échelle des abscisses est 9 fois plus grande que celle des graphiques précédents.

10-1-67 B. PERNEY

Figure 49

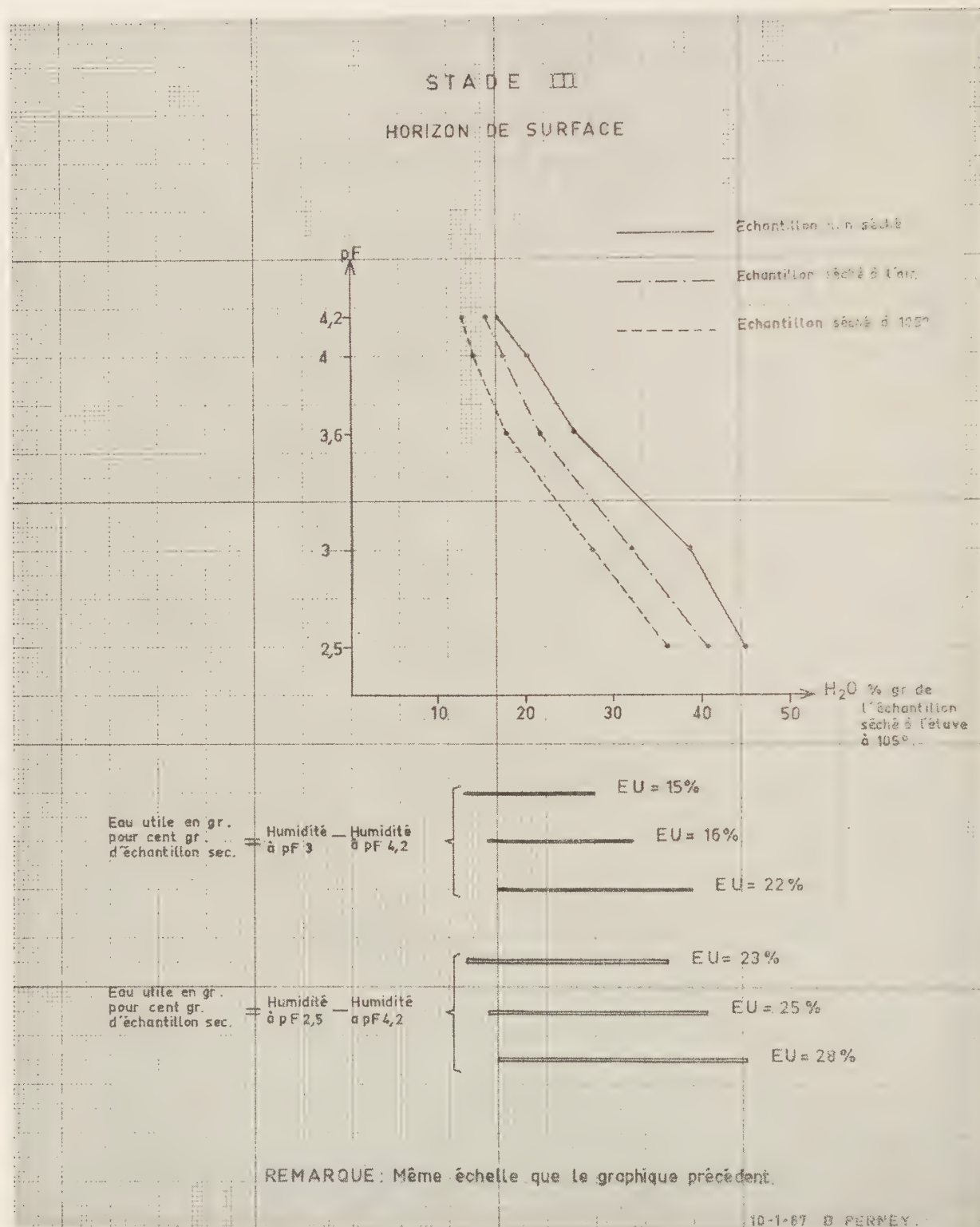
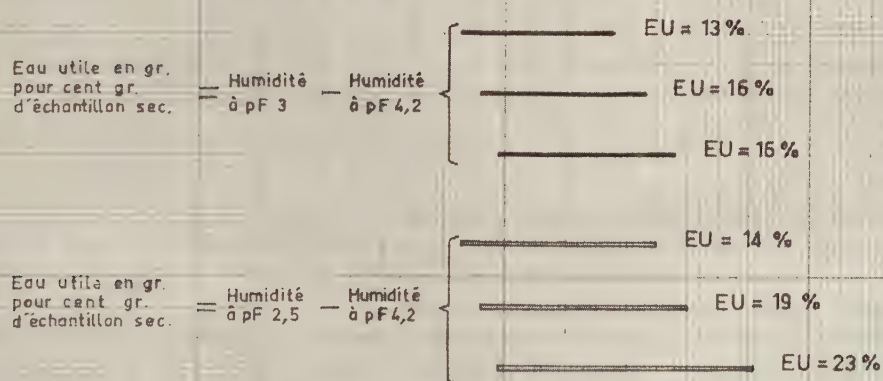
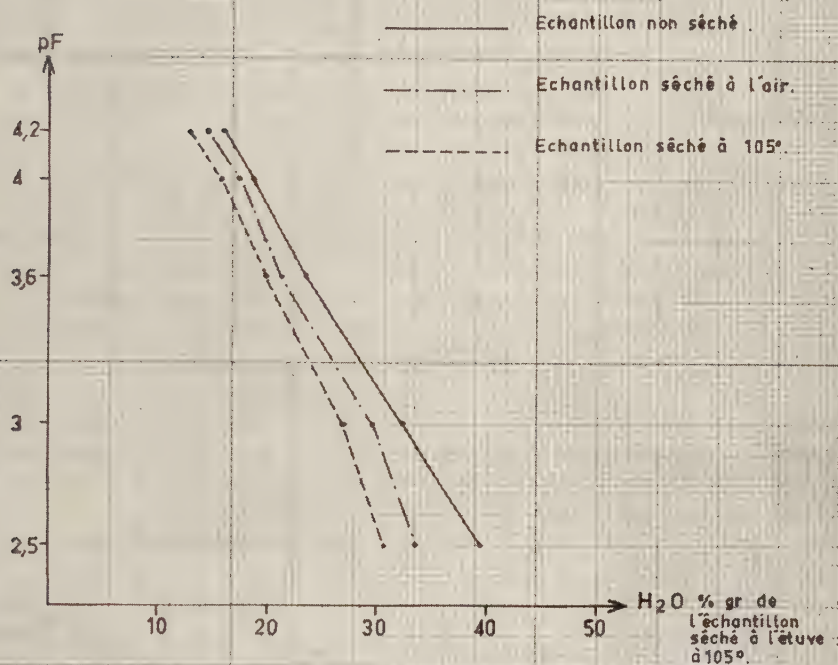


Figure 50

# STADE III HORIZON NON ORGANIQUE



REMARQUE : Même échelle que le graphique précédent.

9-1-67 B. PERNEY.

Figure 50 bis



Les réserves en eau variant dans de larges proportions, d'un horizon à l'autre, il est possible de négliger les variations de densités en fonction de l'état d'humidité et de calculer R par la formule simplifiée  $R = d \cdot (Eau\ utile)$ , dans laquelle d correspond aux valeurs obtenues sur sol humide (valeurs déjà adoptées antérieurement), sans pour cela modifier la hiérarchie existant entre les divers horizons en ce qui concerne leur réserve en eau.

Le tableau qui suit donne les réserves calculées par la formule simplifiée en prenant successivement les humidités à pF 2,5 et à pF 3. Les chiffres que nous pensons préférables de conserver pour les comparaisons sont soulignés. En effet, il convient de retenir pour les horizons très organiques les valeurs correspondant à pF 2,5 et pour les horizons peu organiques, ayant une texture toujours fine, les valeurs correspondant à pF 3.

| Stade évolutif      | Nature de l'échantillon                               |                                                                     | Réserve calculée avec l'humidité à pF 2,5 |                   | Réserve calculée avec l'humidité à pF 3 |
|---------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------------|
| Stade I             | Horizon organique de surface (racines grossières)     | non séché ....                                                      | $0,2 \times 138 =$                        | <u>28</u>         | $0,2 \times 100 = 20$                   |
|                     |                                                       | séché à l'air .                                                     | $0,2 \times 55 =$                         | <u>11</u>         | $0,2 \times 40 = 8$                     |
|                     |                                                       | séché à 105° ..                                                     | $0,2 \times 40 =$                         | <u>8</u>          | $0,2 \times 25 = 5$                     |
|                     | Horizon organique intermédiaire (débris organiques)   | non séché ....                                                      | $0,3 \times 200 =$                        | <u>60</u>         | $0,3 \times 150 = 45$                   |
|                     |                                                       | séché à l'air .                                                     | $0,3 \times 55 =$                         | <u>16</u>         | $0,3 \times 50 = 15$                    |
|                     |                                                       | séché à 105° ..                                                     | $0,3 \times 40 =$                         | <u>12</u>         | $0,3 \times 35 = 10$                    |
|                     | Horizon organique profond (matières organiques fines) | non séché ....                                                      | $0,4 \times 163 =$                        | <u>65</u>         | $0,4 \times 125 = 50$                   |
|                     |                                                       | séché à l'air .                                                     | $0,4 \times 50 =$                         | <u>20</u>         | $0,4 \times 36 = 14$                    |
|                     |                                                       | séché à 105° ..                                                     | $0,4 \times 40 =$                         | <u>16</u>         | $0,4 \times 30 = 12$                    |
| Stade II            | Horizon organique de surface                          | non séché ....                                                      | $0,6 \times 67 =$                         | <u>40</u>         | $0,6 \times 50 = 30$                    |
|                     |                                                       | séché à l'air .                                                     | $0,6 \times 42 =$                         | <u>25</u>         | $0,6 \times 29 = 17$                    |
|                     |                                                       | séché à 105° ..                                                     | $0,6 \times 27 =$                         | <u>16</u>         | $0,6 \times 20 = 12$                    |
| Stade III           | Horizon organique                                     | non séché ....                                                      | $1,0 \times 28 = 28$                      | $1,0 \times 22 =$ | <u>22</u>                               |
|                     |                                                       | séché à l'air .                                                     | $1,0 \times 25 = 25$                      | $1,0 \times 16 =$ | <u>16</u>                               |
|                     |                                                       | séché à 105° ..                                                     | $1,0 \times 23 = 23$                      | $1,0 \times 15 =$ | <u>15</u>                               |
|                     | Horizon non organique                                 | non séché ....                                                      | $1,2 \times 23 = 27$                      | $1,2 \times 16 =$ | <u>19</u>                               |
|                     |                                                       | séché à l'air .                                                     | $1,2 \times 19 = 23$                      | $1,2 \times 16 =$ | <u>19</u>                               |
|                     |                                                       | séché à 105° ..                                                     | $1,2 \times 14 = 17$                      | $1,2 \times 13 =$ | <u>15</u>                               |
| Alluvion fluviatile |                                                       | Valeurs analogues à celles de l'horizon non organique du stade III. |                                           |                   |                                         |

REMARQUE. Les sols préalablement séchés sont en fait un peu plus denses que ceux qui ne l'ont pas été. Ceci est surtout vrai pour les horizons très organiques.

Les résultats précédents, relatifs à une couche de 10 cm de sol, montrent que, bien que les horizons organiques aient de faibles densités, ils ont quand même de fortes réserves en eau (à la condition de ne pas avoir été préalablement déshydratés) si on les compare aux horizons de gley et d'« alluvions fluviatiles ». Cette aptitude à retenir l'eau est fonction du taux des matières organiques et de leur état de finesse.

En nous référant au schéma relatif à la morphologie des divers stades évolutifs, inclus dans ce chapitre, nous pouvons établir le tableau suivant qui donne les réserves en eau pour les 20 premiers centimètres du sol, puis pour les 50 premiers centimètres\*.

Le calcul est ainsi réalisé :

au stade I, l'horizon de surface ayant plus de 50 cm d'épaisseur, la réserve pour 20 cm sera  $28\text{ mm} \times 2$  et pour 50 cm de  $28\text{ mm} \times 5$  ;

\* Voir figure 24.

pour le stade II, l'horizon de surface ne faisant que 20 cm, la réserve pour 20 cm sera :  $40 \text{ mm} \times 2$  et pour 50 cm :  $(40 \times 2) + (60 \times 3)$ , car les 30 derniers centimètres sont représentés par l'horizon sous-jacent ;

au stade III, le raisonnement sera le même, puisque l'horizon non organique commence à 20 cm.

|                                                                 | Réserve en eau (mm) |                                       |                                       |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|                                                                 | Stade I             | Stade II                              | Stade III                             |
| Racines exploitant les vingt premiers centimètres du sol .....  | $28 \times 2 = 56$  | $40 \times 2 = 80$                    | $22 \times 2 = 44$                    |
| Racines exploitant les cinquante premiers centimètres du sol .. | $28 \times 5 = 140$ | $(40 \times 2) + (60 \times 3) = 260$ | $(22 \times 2) + (19 \times 3) = 101$ |

L'évolution par drainage provoque une élévation, puis une diminution des réserves en eau. C'est ainsi qu'au stade II le sol est le moins sensible aux mauvaises irrigations.

En adoptant une évapotranspiration potentielle de 4 mm par jour en période sèche et en admettant que les racines de riz se situent exclusivement dans les 20 premiers centimètres du sol, on peut calculer le temps pendant lequel le végétal vit exclusivement sur les réserves en eau du sol avant de flétrir irréversiblement \*.

|                                                                                                | Stade I             | Stade II            | Stade III           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Durée en jours pendant laquelle le végétal épuise les réserves en eau de 20 cm de sol ressuyé. | $\frac{56}{4} = 14$ | $\frac{80}{4} = 20$ | $\frac{44}{4} = 11$ |

Ces délais sont dans l'ensemble longs et l'on peut dire qu'à tous les stades, mais surtout au stade II, le sol permet bien au végétal de supporter des irrigations irrégulières. Nous reviendrons à cette notion de résistance à la sécheresse dans le chapitre III à propos d'essais en vases de végétation.

### c) PERMEABILITÉ

Seules les mesures au laboratoire sont possibles sur l'ensemble des divers stades évolutifs, à cause du niveau parfois élevé de la nappe.

Les échantillons ne sont pas remaniés. Ils sont découpés au format des colonnes dans lesquelles ils sont placés, pour permettre les mesures de débit.

Le tableau suivant donne le nombre de centimètres cubes d'eau écoulés en une heure à travers 50 g d'échantillon. Il est évident que la colonne correspondant à 50 g d'un horizon très organique est plus haute que celle correspondant à 50 g de gley.

| Stade évolutif  | Nature de l'échantillon         | Perméabilité |
|-----------------|---------------------------------|--------------|
| Stade I .....   | Horizon organique de surface    | 250          |
|                 | Horizon organique intermédiaire | 200          |
|                 | Horizon organique profond       | 100          |
| Stade II .....  | Horizon organique de surface    | 100          |
| Stade III ..... | Horizon organique               | 70           |
|                 | Horizon non organique           | 30           |
|                 | Alluvion fluviale               | 30           |

En considérant non plus 50 g d'échantillon, mais 50 cm<sup>3</sup>, les perméabilités deviennent encore plus élevées pour les horizons à faible densité. Il résulte qu'au stade I la perméabilité est très forte dans les horizons organiques et s'abaisse lorsque la matière organique s'affine, qu'en surface du stade II elle est encore forte, qu'en surface du stade III elle est moyenne et que les gley sont imperméables.

La forte perméabilité des horizons organiques facilite les migrations des complexes fer-matières organiques qui, nous l'avons vu, sont actives.

Un sol non évolué perd très rapidement par drainage son eau de gravité. Seule l'eau utile est alors capable d'alimenter le végétal.

**En résumé,** l'évolution d'une tourbe abaisse progressivement et considérablement les perméabilités.

\* Etude de RIQUIER sur l'ETP à Madagascar.

d) **PLASTICITE**

La plasticité est évaluée par la méthode des bâtonnets, qui consiste à humidifier différemment plusieurs échantillons d'une même terre, puis à les rouler entre deux lames de verre jusqu'à ce que les bâtonnets formés se fractionnent en morceaux cylindriques. Les humidités des bâtonnets qui se fractionnent avec un diamètre de 5, de 3 et de 1 mm sont mesurées. Ce sont elles qui permettent de conclure à la plus ou moins grande plasticité des terres. Une terre non plastique ne donnera jamais de fins bâtonnets, même si elle est fortement humidifiée.

Ce n'est que pour l'horizon de surface du stade III, le gley et l'« alluvion fluviatile », que nous avons des bâtonnets de 1 mm de diamètre. Ils se forment avec moins de 30 % d'humidité.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

| Stade évolutif  | Nature de l'échantillon         | Plasticité  |
|-----------------|---------------------------------|-------------|
| Stade I .....   | Horizon organique de surface    | Nulle       |
|                 | Horizon organique intermédiaire | Faible      |
|                 | Horizon organique profond       | Assez forte |
| Stade II .....  | Horizon organique de surface    | Assez forte |
| Stade III ..... | Horizon organique               | Très forte  |
|                 | Horizon non organique           | Très forte  |
|                 | Alluvion fluviatile             | Très forte  |

L'évolution entraîne donc une augmentation progressive de la plasticité qui finit par devenir très forte.

**En résumé**, l'évolution par drainage accroît puis diminue les réserves en eau de l'horizon de surface des sols, abaisse progressivement les perméabilités qui sont au début trop fortes et augmente les plasticités.

Il en résulte que le stade II présente, en surface, une excellente réserve en eau, une perméabilité moyenne et une plasticité non excessive.

### III) **CONCLUSION SUR L'EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE PAR ACTION COMBINEE DU DRAINAGE ET DU FEU**

Nous allons tout d'abord reprendre, en les résumant, les conséquences essentielles de l'évolution, mises en évidence dans les paragraphes qui précèdent, en faisant abstraction de l'alluvionnement bien qu'il puisse être abondant sur les sols évolués cultivés en riz.

Les effets de cet alluvionnement de surface seront ensuite schématisés.

Enfin, une comparaison entre les divers stades évolutifs d'un sol tourbeux drainé et les sols de la chaîne décrite dans le premier chapitre sera établie.

#### 1) **CONSEQUENCES DU DRAINAGE**

##### a) **CONSEQUENCES SUR LA COUVERTURE VEGETALE**

A mesure que le sol s'assèche, les Cypéracées font place aux Graminées spontanées. Seuls les sols drainés sont favorables à la riziculture.

##### b) **CONSEQUENCES SUR LA MORPHOLOGIE DU PROFIL**

Les horizons organiques perdent leur aspect fibreux et s'amenuisent au point qu'un abaissement de la surface du sol, de l'ordre de plusieurs mètres, en résulte et fait apparaître les reliefs qui existent sous la tourbe.

Le gley se transforme en pseudogley, ne présentant des taches jaunes et rouille bien différenciées que lorsque les teneurs en fer du sol ne sont pas trop faibles.

##### c) **CONSEQUENCES SUR LES CARACTERES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES**

Ce sont principalement les horizons de surface qui sont pris en considération. Les résultats sont exprimés par rapport à un volume de sol.



$\alpha$ ) GRANULOMETRIE

La disparition des matières organiques entraîne une augmentation progressive de la fraction minérale, mais cette fraction conserve tout au long de l'évolution la même texture fine, qui est analogue à celle de la partie supérieure du gley.

 $\beta$ ) ELEMENTS ORGANIQUES

L'évolution provoque un accroissement, puis une baisse :

de l'azote,  
des acides humiques,  
des taux d'humification.

Le stade II présente ainsi les valeurs les plus fortes en ces éléments et possède presque autant de matières organiques totales que le stade I.

Le C/N qui diminue progressivement, par drainage, cesse au stade II d'avoir des valeurs trop élevées.

L'évolution entraîne enfin une augmentation de la proportion des acides humiques liés aux argiles, par rapport aux acides humiques libres, peu polymérisés. La liaison a lieu par l'intermédiaire de l'alumine et accessoirement par le fer.

Le sol tourbeux moyennement évolué (stade II) présente donc en surface d'excellents caractères concernant les éléments organiques devant lui conférer une bonne aptitude à la culture.

 $\gamma$ ) CARACTERES BIOLOGIQUES

Au fur et à mesure de l'évolution d'une tourbe il y a, en surface, un accroissement progressif des activités microbiennes (cellulolyse, fixation d'azote atmosphérique, ammonification, nitrification, activité globale des germes). Les micro-organismes, rares au stade I, sont déjà nombreux dès le stade II. Il apparaît que, lorsque le sol au stade II est placé dans des conditions pédoclimatiques analogues à celles que l'on trouve naturellement au stade III, le sol au stade II présente une activité plus forte que celle obtenue au stade III. Ainsi, en plus de la nature des terres, interviennent largement les conditions pédoclimatiques précédant les tests biologiques.

 $\delta$ ) COMPLEXE ABSORBANT

La capacité d'échange totale suivant les variations des teneurs en acides humiques, c'est au stade II qu'elle est la plus élevée.

La somme des bases échangeables est toujours faible mais présente un léger maximum en surface du stade II.

Le taux de saturation du complexe est assez constant au cours de l'évolution.

C'est donc pour une évolution moyenne (stade II) que sont observés les meilleurs caractères concernant le complexe absorbant.

 $\epsilon$ ) BASES TOTALES ET ACIDE PHOSPHORIQUE TOTAL

L'évolution accroît légèrement la valeur de ces éléments en surface des sols.

 $\zeta$ ) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

L'acidité, très forte au départ, décroît un peu lorsque l'évolution est poussée.

Le pouvoir tampon, maximum pour le stade II, décroît ensuite beaucoup.

 $\eta$ ) NATURE MINERALOGIQUE DES ARGILES

Il n'y a aucune modification de la nature des argiles par drainage des tourbes.

 $\theta$ ) FER

Peu abondant dans les tourbes, où il existe surtout sous forme de gels, il diminue encore par entraînement oblique au cours de l'évolution.

L'augmentation des densités apparentes masque cet appauvrissement, mais aucune chlorose n'apparaît.

 $\iota$ ) RAPPORT SILICE/ALUMINE

Toujours bien inférieur à 2, ce rapport ne varie guère par drainage des tourbes.

L'alumine, bien plus stable que le fer, présente constamment des taux élevés.

## x) CARACTERES PHYSIQUES CONCERNANT LES RELATIONS SOL/EAU

Les réserves en eau, déjà assez fortes au stade I, deviennent très importantes au stade II puis diminuent considérablement.

Toute dessiccation prolongée des horizons organiques rend la réhumectation difficile et provoque un abaissement des réserves en eau.

Les horizons riches en matières organiques atteignent le point de flétrissement des végétaux alors que leur humidité est encore élevée.

## λ.) PERMEABILITE ET PLASTICITE

La perméabilité, particulièrement forte dans les horizons fibreux, diminue à mesure que les matières organiques s'affinent. Elle devient très mauvaise au stade III.

La plasticité, nulle en surface avant drainage, devient peu à peu très forte.

L'examen de l'ensemble des conséquences du drainage sur un sol tourbeux montre que c'est pour une évolution moyenne (stade II) que le sol a, en surface, les meilleurs caractères concernant :

les éléments organiques,  
le complexe absorbant,  
la réserve en eau,  
les perméabilités,  
et les plasticités.

De plus, le sol au stade II présente :

des proportions équilibrées entre la fraction minérale (limon + argile + sable) et la fraction organique ;

une bonne activité microbienne ;

des teneurs en bases totales et en acide phosphorique total intermédiaires entre celles relatives aux stades I et II.

Ainsi, une évolution moyenne des tourbes conduit à un sol qui est doté de caractères favorables à la production agricole.

## 2) EFFETS DE L'ALLUVIONNEMENT

Lorsque le sol est cultivé en riz, il reçoit chaque année en surface un fin dépôt d'alluvion limono-argileuse provenant de la décantation des eaux d'irrigation.

Cet apport, mélangé ensuite par labour à l'horizon de surface, peut jouer un rôle non négligeable sur les propriétés des tourbes drainées. Ce rôle est d'autant plus important que les tourbes drainées sont encore riches en matières organiques.

Les actions essentielles de l'alluvionnement sont :

une augmentation :

de la densité,

de la fraction minérale du sol par rapport à sa fraction organique, sans que la texture en soit pour autant modifiée,

de la somme des bases échangeables, des bases totales provoquant une légère hausse du pH et de l'acide phosphorique total,

de la plasticité ;

un enrichissement en germes (cellulolytiques, fixateurs d'azote, ammonifiants et nitrificateurs) ;

une diminution :

de la capacité d'échange totale,

des réserves en eau,

des perméabilités.

### 3) COMPARAISON ENTRE LES DIVERS STADES EVOLUTIFS ET LES SOLS DE LA CHAÎNE DECRITE DANS LE CHAPITRE I

Cette comparaison porte sur les sols moyennement ou peu hydromorphes puisque le sol très hydromorphe (sol tourbeux) est commun à la chaîne étudiée et à l'évolution prise en considération.

#### a) SOLS MOYENNEMENT HYDROMORPHES

L'étude de la chaîne des sols montre que, pour un degré d'hydromorphie placé entre celui donnant des « sols à gley réduits » et celui donnant des « sols semi-tourbeux », nous obtenons, en surface des profils, les meilleurs résultats concernant les éléments organiques et la capacité d'échange totale \*.

Ces sols, en plus de leurs caractères analytiques propices à la production végétale, présentent naturellement un degré d'ennoyage favorable à la riziculture. Ils sont empiriquement recherchés par l'agriculteur.

L'évolution par drainage d'une tourbe montre que les meilleurs caractères analytiques obtenus correspondent à un sol conservant un hydromorphie moyenne.

Ces deux séries d'observations amènent à conclure que dans une dépression, du moment que les conditions de drainage sont stables depuis quelques décennies, les sols présentant les meilleurs caractères analytiques sont ceux qui subissent un ennoyage en surface de 5 à 8 mois par an, quelles qu'aient été les conditions antérieures de leur engorgement (sol à gley réduit et semi-tourbeux ou sol tourbeux au stade II).

Morphologiquement, les profils provenant d'une tourbe drainée se distinguent nettement de ceux qui n'ont jamais subi d'ennoyage très intense \*\*.

#### b) SOLS PEU HYDROMORPHES

Une vision rapide des conséquences du drainage sur une tourbe donne l'impression que les actions sont inverses de celles que l'on observe dans une chaîne de sols hydromorphes, en passant du sol le moins hydromorphe au sol le plus hydromorphe. Il est vrai que certaines empreintes de l'hydromorphie disparaissent progressivement et de manière absolue par drainage ; c'est le cas du stock de matières organiques. Par contre, d'autres subsistent ; par exemple : la texture et l'appauvrissement en bases ou en fer.

Il n'y a donc pas, par évolution, retour aux sols peu hydromorphes de la chaîne.

On verra, en effet, dans le Chapitre III, que les aptitudes culturales d'un sol au stade III sont mauvaises, alors que celles des « alluvions fluviales récentes », qui sont proches des « sols marmorisés », sont bonnes.

Après avoir étudié l'évolution à brève échéance des tourbes, nous ferons intervenir, à la fin de ce chapitre, les empreintes stables laissées par l'hydromorphie pour différencier dans une classification pédologique les sols ayant été très hydromorphes de ceux qui ont toujours échappé aux fortes actions de nappes.

## EVOLUTION A BREVE ECHEANCE PAR ACTION IMMEDIATE D'UN BRULAGE

Au début de ce chapitre, il a été souligné qu'à Madagascar l'évolution est toujours liée au feu \*.

Nous avons, jusqu'ici, étudié l'évolution d'une tourbe à longue échéance, résultant du drainage et des incendies, en laissant de côté les sols récemment brûlés pour éviter de saisir les actions fugaces des incendies.

Dans ce sous-chapitre, par contre, il sera traité des feux récents, dont l'action est particulièrement profonde en sols très organiques.

Au cours d'un premier paragraphe, sera étudiée l'intensité des incendies.

Le second paragraphe sera consacré aux conséquences du feu sur la morphologie des profils.

Le troisième se rapportera aux actions du feu sur les caractères physiques, chimiques et biologiques des sols.

Enfin, le quatrième, permettra de préciser les répercussions des brûlages sur les érosions.

Une conclusion résumera l'ensemble de nos observations.

\* Voir figures 17, 18, 16 bis et 19.

\*\* Voir figures 14 et 24.

\*\*\* Voir page 62.



## 1) INTENSITE DES INCENDIES

L'intensité des incendies dépend du volume des matières organiques, vivantes ou non, susceptibles de brûler et de leur état de déshydratation lié à l'efficacité du drainage.

Nous examinerons successivement les incendies se propageant sur les divers stades évolutifs d'un profil tourbeux.

### STADE I

Lorsque le drainage s'opère sur une tourbe, la végétation dense de *Cyperus emyrensis*, appelés localement « zozoro », se dessèche ainsi que le profil lui-même.

Avec un drainage particulièrement efficace, une tourbe non évoluée peut se dessécher dans l'ensemble de son profil. S'il y a incendie, les horizons de racines grossières et de débris de racines sont assez riches en matières organiques pour entretenir le feu amorcé par la végétation.

Dans ce cas extrême, les incendies sont puissants. Au Lac Alaotra, par exemple, où il existe plusieurs dizaines de milliers d'hectares de tourbe d'un seul tenant, le front des flammes atteint plusieurs kilomètres de long. Les flammes s'étirent à plus de 10 m de hauteur et les cendres et des débris organiques charbonneux, entraînés par des courants ascensionnels, obscurcissent le ciel (fig. 51, 51 bis et 52).

Si le drainage est au départ un peu moins efficace après passage du front de flammes qui consomment la végétation et une partie de la tourbe, il s'établit une combustion comparable à celle de l'amadou, alimentée par la tourbe restante. Ce type de foyer peut durer un ou deux semaines et passe parfois inaperçu.

Les combustions peuvent abaisser la cote topographique de la surface du sol à tel point que les canaux de drainage disparaissent quasi totalement. Il convient donc de les recreuser pour poursuivre l'abaissement de la nappe.

Un amortissement naturel de l'effet des feux a lieu par disparition progressive du combustible. La végétation de Cypéracées peut se régénérer assez rapidement puisque le brûlage remet la surface du sol au niveau de la nappe phréatique, mais la tourbe ne se constitue que lentement.

L'horizon de racines grossières est, de loin, celui qui brûle le mieux à cause de sa grande richesse en matières organiques, de la vitesse avec laquelle il se ressuie, de son assèchement plus rapide que celui des horizons organiques qui lui sont sous-jacents et, enfin, de sa bonne aération une fois sec.

L'expérience suivante, réalisée sur une tourbe ayant déjà été brûlée une fois mais possédant encore une partie de son horizon de racines grossières et des jeunes pousses de *Cyperus emyrensis*, facilite l'évaluation de l'ordre de grandeur des températures atteintes lors des incendies :

Pour effectuer les mesures, une fosse pédologique cubique de 40 cm d'arête est creusée ; sur un des murs verticaux, sont enfoncés horizontalement des pyromètres et des thermomètres de façon que leur extrémités soient placées à 25 cm du mur ; la fosse est ensuite recouverte d'une plaque isolante, puis l'incendie est allumé.

Les résultats obtenus sont portés sur la figure 53.

Dans cette expérience, les températures atteintes sont déjà assez élevées en surface du sol, bien que la végétation alimente peu l'incendie et ne lui permette donc pas de se développer pleinement.

### STADE II

La végétation constituée de *Cyperus latifolius*, dont la taille est bien moins haute que celle des *Cyperus emyrensis*, ou encore de riz, dont il ne reste que les pailles, alimente moins bien le feu. D'autre part, les oxydations lentes et l'apport d'alluvion fluviale diminuant les teneurs en matières organiques de l'horizon de surface (moins de 30 % de matière organique totale), le sol devient peu combustible.

Nous avons réalisé des mesures de températures en adoptant encore le système de la fosse cubique, dans laquelle nous plaçons des thermomètres. L'expérience se réalise dans un sol au stade II, qui présente les caractères suivants : la nappe phréatique est située assez bas pour permettre aux horizons de surface de bien s'assécher, la végétation est constituée de *Cyperus latifolius* denses.

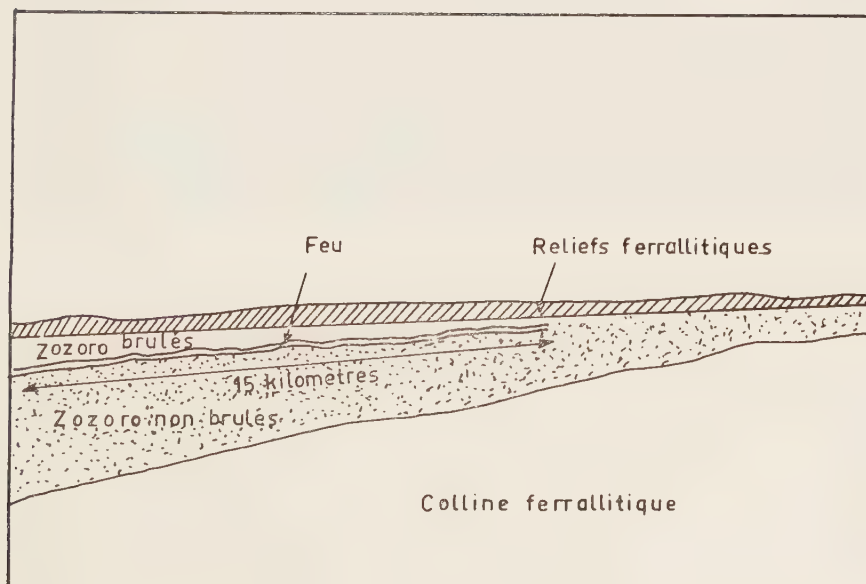
Les résultats obtenus sont portés sur la figure 54.

Le feu n'élève assez fortement la température que dans les cinq premiers centimètres et la combustion des matières organiques du sol ne se réalise que très superficiellement. Pour que des brûlages de ce type aient une forte action sur le sol, ils doivent être répétés dans le temps.

Fig. 51 et 51 bis

FEU DANS LES ZOZORO DU MARAIS

(Lac Alaotra)



### STADE III

La végétation à base de Graminées spontanées ou la paille de riz alimentent mal le feu et le sol n'est plus assez organique pour brûler. Il en résulte que la température du sol ne s'élève que très peu, même en surface. Ces résultats confirment ceux obtenus par PITOT et MASSON qui ont étudié les augmentations de température dans la partie superficielle des profils pédologiques, augmentations consécutives au brûlage des Graminées.

**En résumé**, à mesure que les incendies se succèdent sur un sol tourbeux soumis à un drainage progressif, leur intensité baisse et une tourbe au stade II est déjà peu vulnérable au feu.

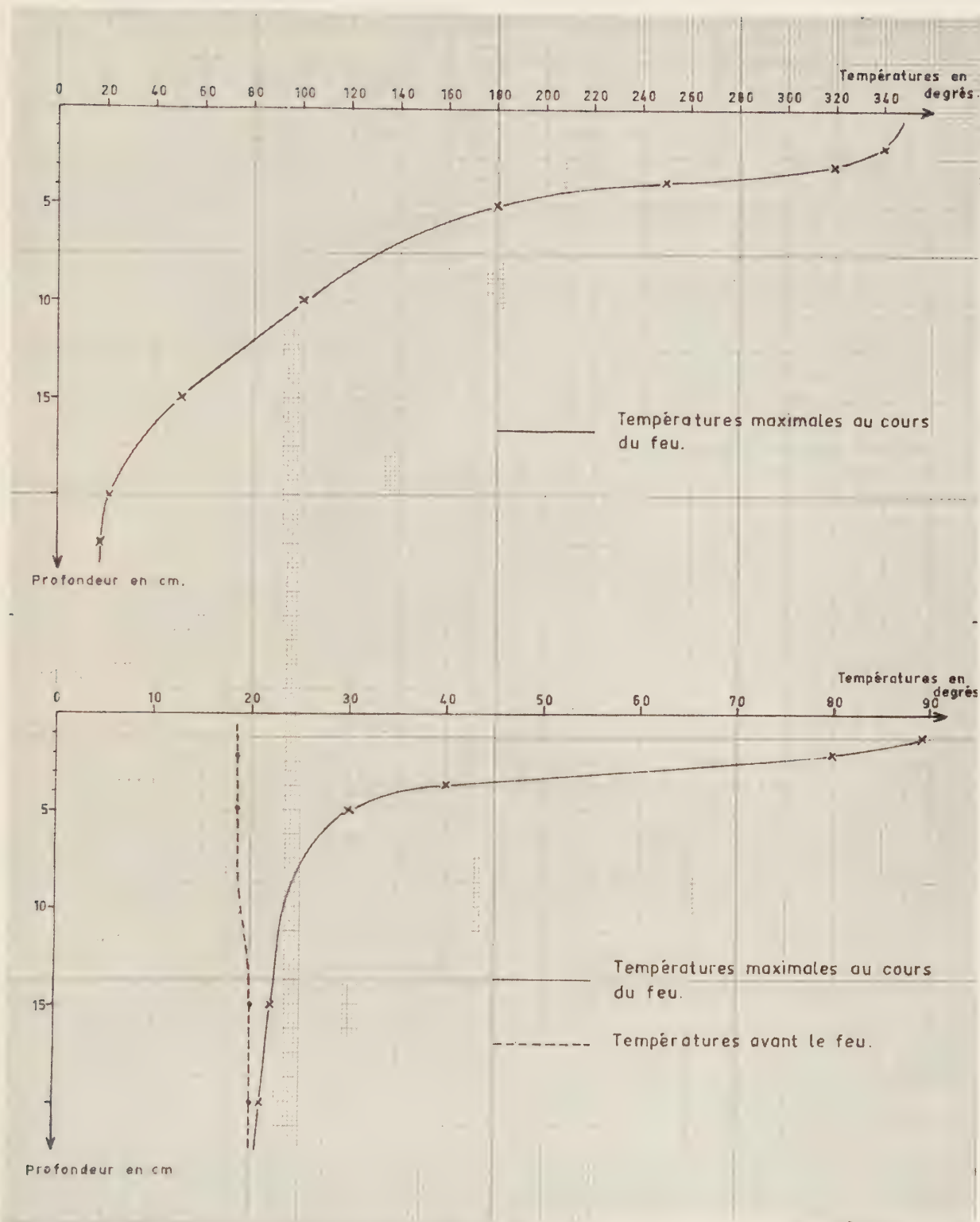
Fig. 52

#### ZOZORO EN FEU



Ces feux se propagent sur un front atteignant 15 à 20 km, durent parfois plusieurs semaines et détruisent des dizaines de milliers d'hectares de zozoro. Leur fumée obscurcit le ciel. Après destruction de la végétation, la tourbe se consume lentement, sans flamme.





Figures 53 et 54

## II) CONSEQUENCES DU FEU SUR LA MORPHOLOGIE DES PROFILS

### A) DECAPAGE DES HORIZONS ORGANIQUES ET FORMATION D'HORIZONS CENDREUX

#### STADE I

Le drainage d'un marais très noyé se réalise par des canaux creusés à la drague qui permettent un assèchement de la surface du sol, favorisant ainsi l'incendie qui consume à la fois la végétation et la partie supérieure du sol tourbeux.

Après incendie, un nouveau passage de drague peut être envisagé, ou déjà un passage de pelle mécanique, montée sur chenilles et roulant sur les déblais qu'elle constitue.

Ces à-coups dans l'amélioration du drainage ont pour effet de livrer la tourbe à l'incendie par tranches successives.

Rares sont les drainages d'une efficacité telle qu'en une année ou deux la tourbe soit asséchée au point que l'incendie puisse englober en une fois la végétation, l'horizon de racines grossières et celui de débris organiques.

Les brûlages concernent donc surtout les horizons de racines grossières et, plus accessoirement, l'horizon de débris organiques.

Sur un profil plus ou moins décapé, on aura donc généralement après incendie un horizon de cendres possédant des débris charbonneux, dont l'épaisseur est comprise entre 5 et 10 cm et qui s'amenuise rapidement par érosion.

En effet, le brûlage ayant lieu en saison sèche, les érosions éoliennes intenses interviennent immédiatement après l'incendie. De plus, en saison des pluies, les eaux entraînent obliquement ce qui reste de cendres. Nous reviendrons à ces érosions dans le quatrième paragraphe de ce chapitre.

#### STADE II

Il se forme un petit horizon cendreux, provenant presque intégralement des résidus de combustion de la végétation.

#### STADE III

Les pailles de riz donnent très peu de cendres.

### B) NOTION DE TASSEMENT

Dans le sous-chapitre précédent nous avons pris en considération le tassement résultant de l'effet global de l'assèchement, des incendies et des oxydations plus lentes des matières organiques \*. Cherchons maintenant à préciser le rôle exclusif du feu sur le tassement, en prenant pour référence des mesures réalisées sur le terrain et au laboratoire.

#### a) MESURES SUR LE TERRAIN

Sur un périmètre tourbeux, en cours de récupération dans la région du Lac Alaotra, nous avons enfoncé verticalement des échelles métalliques qui, pénétrant le gley, gardent une cote topographique stable et permettent aussi d'évaluer les tassements de la surface des sols d'une année à l'autre. Ces échelles montrent que la seule dessiccation des tourbes entraîne des contractions considérables, souvent réversibles par réhumectation.

Elles montrent aussi que le plus fort incendie observé donne 15 cm de cendres très fines et très légères par combustion de 50 cm de racines grossières et d'une végétation dense de Cypéracées.

Les difficultés à rendre les drains fonctionnels au point de pouvoir assécher à volonté le profil afin de mesurer d'une part la contraction maximale consécutive à la dessiccation, puis, d'autre part, les effets du brûlage, nous ont conduit à réaliser une expérimentation en laboratoire.

\* Voir page 69.

## b) MESURES AU LABORATOIRE

Les dessiccations seront particulièrement poussées, puisqu'elles s'effectuent à l'étuve à 105° jusqu'à poids constants, et les brûlages très intenses, puisqu'ils se réalisent avec une source d'énergie supplémentaire, celle d'un bec de gaz. Sur le terrain, la végétation et la tourbe sont les seules sources d'énergie.

Les modalités de l'expérimentation sont les suivantes :

les différents horizons des sols gorgés d'eau sont prélevés à l'aide d'un cylindre de un litre dont la partie inférieure, très coupante, évite la compression au moment du prélèvement ;

dès que le cylindre contient son échantillon, on lui place une base métallique grillagée qui permet l'écoulement de l'eau de gravité. L'échantillon et son cylindre sont mis à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant, puis pesés (fig. 55 et 55 bis). L'échantillon est ensuite démantelé, passé au rouleau en caoutchouc, mis dans une capsule et soumis à la flamme d'un bec de gaz. Le bec de gaz est placé au-dessus de la capsule et orienté obliquement vers le bas ;

l'échantillon est remué à la spatule pendant le brûlage, qui cesse lorsqu'il n'y a plus de réduction apparente du volume.

Cette technique simple permet la combustion de la majorité des matières organiques et entraîne partiellement une perte d'eau de constitution des kaolinites qui peut être sensible dans les échantillons riches en argiles.

L'expérience donne les pertes en volume suivantes :

|                |                                                | Perte par déshydratation<br>exprimée par rapport au sol<br>gorgé d'eau<br>(%) | Perte par brûlage<br>exprimée par rapport au sol<br>séché à 105°<br>(%) |
|----------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Stade I .....  | Horizon de racines grossières                  | 34                                                                            | 79                                                                      |
|                | Horizon de débris organiques                   | 45                                                                            | 48                                                                      |
|                | Horizon constitué de matières organiques fines | 40                                                                            | 34                                                                      |
| Stade II ..... | Horizon de surface                             | 30                                                                            | 34                                                                      |
| Stade III .... | Horizon de surface                             | 12                                                                            | Non soumis au brûlage<br>parce que trop peu<br>organique                |
|                | Horizon de gley                                | 10                                                                            |                                                                         |

La contraction en volume par dessiccation est donc fonction de la teneur en matière organique et de son état de finesse. Un horizon fibreux se contracte bien moins qu'une tourbe fine.

Le brûlage provoque un tassement d'autant plus grand que les taux de matières organiques sont élevés, cela quelle que soit la structure de ces matières organiques.

Les pertes globales en volumes, exprimées par rapport au sol gorgé d'eau, consécutives à la dessiccation et au brûlage sont les suivantes :

|             |                                      |                                                        |           |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------|
|             | Horizon de racines grossières .....  | 34 % par déshydratation puis 79 % du reste par brûlage | soit 86 % |
| Stade I ... | Horizon de débris organiques .....   |                                                        | 72 %      |
|             | Horizon de matières organiques fines |                                                        | 60 %      |
|             | Horizon de surface .....             |                                                        | 52 %      |

Ces chiffres montrent l'ampleur des contractions en volume particulièrement marquées sur les sols très organiques.

En prenant un sol au stade I possédant un horizon de racines grossières et un horizon de débris organiques ayant chacun 1 m d'épaisseur, le tassement provoqué par la dessiccation et le brûlage de ces deux horizons est de 160 cm. De plus, les cendres produites s'élimineront par érosion.

Le tassement a donc de fortes répercussions sur les techniques de mise en valeur des tourbes, surtout lorsque leurs horizons organiques sont très épais.

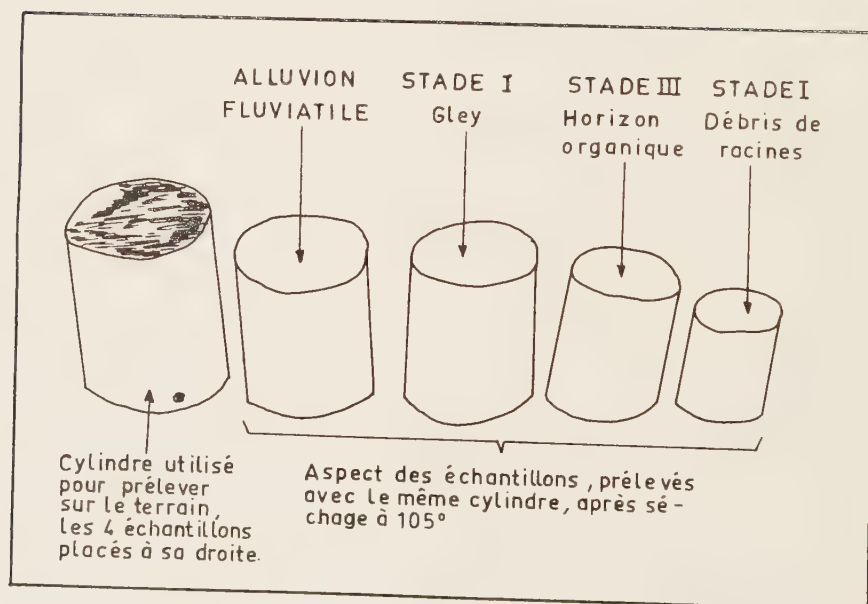
La réhumectation du sol après brûlage ne provoque que peu d'augmentation du volume des cendres.

Dans certains périmètres tourbeux drainés, l'importance des tassements est soulignée par la mise en relief d'anciens lits de rivières serpentant dans les tourbes. En effet, les lits reposant sur des alluvions sableuses ne se tassent pas par drainage, alors que, pour les tourbes, l'abaissement de leur niveau supérieur est considérable (fig. 57 et 57 bis).



Fig. 55 et 55 bis

CONTRACTIONS CONSECUTIVES A LA DESHYDRATATION



**En résumé,** l'action du feu sur la morphologie des profils s'exerce entre les stades I et II. Elle a pour effet de faire disparaître l'horizon de racines grossières et, généralement, une partie de l'horizon de débris de racines.

Ce décapage du profil s'exerce, dans la majorité des cas, par tranches successives, chaque tranche correspondant à une amélioration du système de drainage.

Toute combustion donne naissance à un horizon cendreux, très sensible aux érosions, donc fugace.

La cote topographique des surfaces tourbeuses se trouve considérablement abaissée par le passage des feux. C'est ainsi qu'un horizon de surface d'une touche au stade I subissant un assèchement, un brûlage et une réhumectation ne conserve, avant toute érosion, que 14 % de son volume initial.

Fig. 56

#### FENTES DE RETRAIT DANS UN PSEUDOGLEY DU STADE III

(La mise en surface du pseudogley est due à un décapage de l'horizon organique, consécutif à des travaux de planage.)

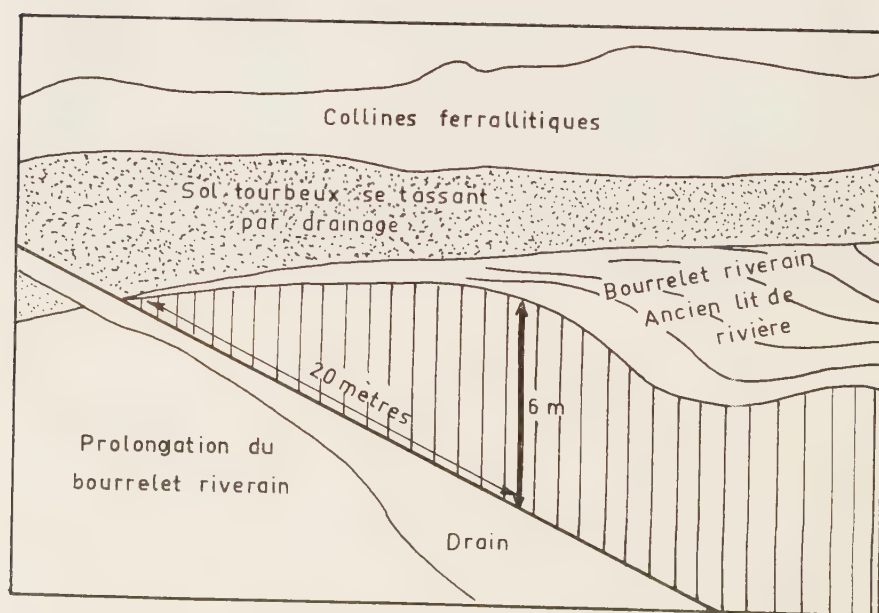


Les fentes descendent jusqu'à 1 m de profondeur. Leur largeur croît en s'approchant de la surface du sol, où elle atteint 7 cm.

Fig. 57 et 57 bis

TASSEMENT DES TOURBES MIS EN EVIDENCE PAR UN ANCIEN LIT DE RIVIERE

(Plaine de l'Ifanja.)





### III) ACTION DU FEU SUR LES CARACTERES ANALYTIQUES DES PROFILS

Avant de passer en revue l'action du feu sur :

- la granulométrie,
- les éléments organiques,
- les caractères biologiques,
- le complexe absorbant,
- les bases totales et le  $P_2O_5$  total,
- le pH et le pouvoir tampon,
- les caractères physiques concernant les relations sol-eau,

il importe de souligner que les caractères analytiques des profils, dans la zone exploitée par les racines d'un végétal vivant, peuvent être influencées par le feu de deux manières.

Dans le premier cas, la tranche du profil nourrissant le végétal est modifiée par le dépôt à sa surface de cendres provenant exclusivement de la combustion de la végétation ayant précédé celle qui couvre actuellement le sol. Le profil lui-même n'est pas modifié.

Dans l'autre, l'horizon cendreux provient, partiellement ou en totalité, de la combustion de la tourbe. L'action du feu est donc plus profonde. Il y a, à la fois, ablation partielle du profil et enrichissement en cendres.

Les résultats qui sont énoncés dans ce paragraphe se rapportent à des incendies se propageant sur le marais. Ces incendies forment des cendres fines, dans lesquelles la minéralisation n'est pas poussée à l'extrême et qui comportent des débris charbonneux. Ces cendres contribueront à la nutrition des végétaux se développant après incendie.

#### A) GRANULOMETRIE

La somme en poids des argiles, limons et accessoirement sables contenus dans un horizon tourbeux très organique, exprimée par rapport à un échantillon global groupant les éléments minéraux et organiques, augmente à mesure que les matières organiques se consomment.

#### B) ELEMENTS ORGANIQUES

##### STADE I

La végétation dense et haute de *Cyperus emyrensis* fournit une cendre abondante. Il en est de même pour les horizons organiques de surface qui sont de bons combustibles et ont un fort volume.

La cendre produite, quelle que soit son origine, est légère et soufflée. Sa densité est voisine de 0,5. Elle a tendance à flotter lorsque la nappe phréatique remonte rapidement et se dilate très peu à la réhydratation.

Le tableau qui suit rappelle les teneurs en éléments organiques d'un horizon de racines grossières, exprimées par rapport à un volume de tourbe hydratée, et donne les teneurs en éléments organiques de cendres provenant soit de la combustion des parties aériennes des *Cyperus emyrensis*, soit de l'horizon de racines grossières. Ces teneurs sont exprimées par rapport à un volume de cendre hydratée.

|                                                                         | Carbone<br>(% cm <sup>3</sup> ) | Mat.<br>organ.<br>totale<br>(% cm <sup>3</sup> ) | N<br>total<br>(% cm <sup>3</sup> ) | NH <sub>4</sub><br>(% cm <sup>3</sup> ) | NO <sub>2</sub> + NO <sub>3</sub><br>(% cm <sup>3</sup> ) | $\frac{C}{N}$ | Humus au FINa                    |                             |
|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------|-----------------------------|
|                                                                         |                                 |                                                  |                                    |                                         |                                                           |               | Ac. hum.<br>(% cm <sup>3</sup> ) | Taux<br>d'humifi-<br>cation |
| Cendre obtenue par combustion de la végétation.                         | 5,5                             | 9,5                                              | 3                                  |                                         |                                                           | 18            | 0,2                              | 0,2                         |
| Horizon de racines grossières non brûlé .....                           | 9,2                             | 16                                               | 2,6                                | 0,12                                    | 0,07                                                      | 35            | 7                                | 4,3                         |
| Cendre provenant de la combustion de l'horizon de racines grossières .. | 5,2                             | 8,9                                              | 3                                  | 0,03                                    | 0,02                                                      | 17            | 1,8                              | 2,0                         |

Ces résultats montrent une similitude entre les cendres provenant de la végétation et celles dérivées de tourbe, sauf pour les teneurs en humus.

Les cendres de l'exemple choisi ont encore en moyenne environ 9 g de matière organique totale pour 100 cm<sup>3</sup> de cendre humique, ce qui est élevé.

Elles ont, de plus, par unité de volume, au moins autant d'azote total que la tourbe non brûlée.

Cela ne signifie pas pour autant que la combustion n'entraîne pas de perte du stock d'azote total.

En effet, dans 100 cm<sup>3</sup> de tourbe humide, nous avons 0,26 g d'azote total.

Or, 100 cm<sup>3</sup> de tourbe, après asséchement et brûlage, donnent 14 cm<sup>3</sup> de cendres dont le volume change peu par hydratation.

Comme 100 cm<sup>3</sup> de cendres contiennent 0,30 g d'azote total, 14 cm<sup>3</sup> en contiennent :

$$\frac{0,30 \times 14}{100} = 0,04 \text{ g}$$

Les chiffres 0,26 et 0,04 sont entre eux comme les chiffres 6,5 et 1. Il y a donc, après brûlage, un stock d'azote six fois moins grand qu'au départ.

A l'encontre de l'azote total, le brûlage d'une tourbe a pour effet de diminuer la teneur en azote ammoniacal par unité de volume. Il en est de même pour NO<sub>2</sub> + NO<sub>3</sub>.

L'incendie diminue considérablement les stocks de carbone du sol. Un raisonnement analogue à celui énoncé pour l'azote total nous amène à comparer les chiffres 9,2 et 0,72 qui sont, entre eux, comme les chiffres 12,7 et 1. La chute des stocks de carbone est donc deux fois plus rapide que celle de l'azote.

La combustion entraîne un abaissement du C/N et des taux d'humification.

## STADE II

Le sol brûlant mal, les cendres sont dérivées de la végétation, composée de *Cyperus latifolius*.

Après le passage du feu sur cette végétation desséchée, les cendres produites présentent des teneurs en éléments organiques, voisines de celles que nous venons de donner pour les cendres dérivées de *Cyperus emyrnensis*. Toutefois, leur volume est bien plus faible.

## STADE III

Les pailles de riz se consomment plus complètement que les *Cyperus*. Les cendres produites seront donc moins organiques que celles que nous venons d'étudier. La combustion des pailles de riz est meilleure, parce que cette plante est annuelle et se dessèche naturellement en fin de cycle végétatif, alors que les Cypéracées sont pérennes. De plus, dès que l'irrigation est coupée en rizière, le sol s'assèche vite, n'étant plus soumis à l'influence d'une nappe phréatique.

Nous déconseillons sur ce sol peu organique de brûler les pailles. Il est préférable de les enfouir.

**En conclusion**, le feu qui parcourt les tourbes drainées forme des cendres partielles dans lesquelles les teneurs en éléments organiques sont encore bonnes.

## C) CARACTERES BIOLOGIQUES

Le feu joue de deux manières sur l'activité microbienne. Il modifie, en effet, le milieu sol et tue les germes.

## STADE I

Lorsque la combustion n'intéresse que les végétaux, l'horizon organique de surface, qui possède une faible activité microbienne, se trouve recouvert de cendres exemptes de germes. Ces cendres peuvent être ensemencées par des germes de l'horizon qu'elles recouvrent ou par ceux, entraînés par les vents et les eaux d'ennoyage, provenant de terres non brûlées.

Si le feu consume la tourbe, le sol perd toute activité microbienne et le réensemencement par des germes venant des terres non brûlées est indispensable.

Le milieu cendreux une foisensemencé a une activité biologique, définie par ses caractères chimiques et physiques, qui en général est supérieure à celle observée dans l'horizon de surface d'une tourbe non brûlée.

## STADE II

Le feu consumant la végétation et n'échauffant guère le sol, les germes ne sont pas gênés par l'incendie. La modification de nature du milieu, consécutive à la présence de cendres, a quelques répercussions sur les activités microbiennes.

## STADE III

L'incendie ne détruit pas les germes et ne modifie guère le milieu. Son action est donc très faible.

## D) COMPLEXE ABSORBANT

### STADE I

Donnons un tableau rappelant les teneurs en bases échangeables et la capacité d'échange totale d'un horizon tourbeux constitué de racines grossières, l'expression des résultats se faisant par rapport à un volume de tourbe humide \*.

Ce tableau indique également les teneurs en bases échangeables et la valeur de la capacité d'échange totale de cendres provenant, soit de la combustion des parties aériennes de *Cyperus emyrnensis*, soit de l'horizon de racines grossières. L'expression des résultats s'effectue par rapport à un volume de cendre hydratée.

|                                                                       | Milliéquivalents pour 100 cm <sup>3</sup> |     |                  |                   |                 |                           | $\frac{S \times 100}{T}$ |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----|------------------|-------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|
|                                                                       | CaO                                       | MgO | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Somme des bases | Capacité d'échange totale |                          |
| Cendre obtenue par combustion de la végétation .....                  | 3                                         | 17  | 20               | 18                | 58              |                           |                          |
| Horizon de racines grossières non brûlé .....                         | 0,6                                       | 0,4 | 0,14             | 0,06              | 1,2             | 11                        | 11                       |
| Cendre provenant de la combustion de l'horizon de racines grossières. | 2,0                                       | 3,0 | 1,5              | 1,0               | 7,5             | 8                         | 94                       |

La cendre obtenue par le brûlage de l'horizon de racines grossières est bien plus riche en bases échangeables, par unité de volume, que cet horizon avant brûlage.

Si l'on compare les résultats obtenus pour les deux cendres, nous constatons que celle qui dérive des parties aériennes de la végétation est bien plus riche que l'autre. Ceci est particulièrement marqué pour K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O.

Pour donner une explication à cette différence, deux expériences sont réalisées :

#### a) PREMIERE EXPERIENCE

Des *Cyperus emyrnensis* adultes et bien développés sont arrachés avec leurs racines entières. Ils sont fractionnés en deux parties : partie aérienne et partie souterraine.

Ces deux fractions, contenant environ 80 % d'eau, sont séchées puis broyées finement. Sur les poudres obtenues, on applique, comme à un sol, la technique de mesure des bases échangeables.

Les résultats obtenus, exprimés en poids, montrent que la partie aérienne est nettement plus riche en K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O que la partie souterraine. Pour MgO, les différences sont dans le même sens, mais moins marquées. Pour CaO, elles sont faibles.

Il est donc normal que les tourbes, qui sont principalement constituées de racines mortes plus ou moins fragmentées, donnent des cendres moins riches que celles dérivées des parties aériennes des *Cyperus emyrnensis*.

\* Voir page 94.



## β) DEUXIEME EXPERIENCE

Agitons mécaniquement pendant 16 heures, dans 400 cm<sup>3</sup> d'eau distillée, 20 g de poudre obtenue par broyage, soit des racines vivantes de *Cyperus emyrensis*, soit de racines mortes de ce même végétal provenant de l'horizon de surface d'une tourbe au stade I. Les résultats suivants sont obtenus sur les filtrats :

|                                                                    | Milliéquivalents pour 100 g de poudre |     |                  |                   |                              |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----|------------------|-------------------|------------------------------|
|                                                                    | CaO                                   | MgO | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Somme des bases échangeables |
| Racines vivantes broyées .....                                     | 0,5                                   | 0,6 | 1,1              | 1,2               | 3,4                          |
| Racines mortes commençant à se désagréger passées au broyeur ..... | 0,2                                   | 0,2 | 0,1              | 0,2               | 0,7                          |

Ces chiffres montrent que le lessivage entraîne moins d'éléments sur les poudres provenant des racines mortes et en début de désagrégation que sur les poudres provenant des racines intactes. Il est donc vraisemblable que, dès la désagrégation, les eaux de la nappe phréatique, à mouvement oblique, lessivent les éléments minéraux et qu'il y a ainsi un appauvrissement des racines mortes par rapport aux racines vivantes.

Les tourbes, étant surtout constituées de racines mortes en début de désagrégation, ne peuvent que donner des cendres moins riches que celles dérivées de végétaux vivants.

Les cendres perdent leurs bases échangeables par lessivage à l'eau. C'est ainsi que, après percolation sur filtre par plusieurs litres d'eau, une cendre dérivée de l'horizon de surface d'une tourbe ne présente plus, pour 100 cm<sup>3</sup> de cendre humide, que :

1,1 milliéquivalents de CaO  
 0,7 milliéquivalents de MgO  
 0,1 milliéquivalents de K<sub>2</sub>O  
 0,4 milliéquivalents de Na<sub>2</sub>O \*

## STADE II

Les parties aériennes des *Cyperus latifolius* donnent une cendre dont les caractères sont très voisins de celle obtenue par combustion des parties aériennes des *Cyperus emyrensis*.

## STADE III

Le brûlage des pailles enrichit également le sol en bases échangeables.

## E) BASES TOTALES ET ACIDE PHOSPHORIQUE TOTAL

## STADE I

Lorsque l'on réduit en cendre un matériel végétal, Ca, Mg, K et P total contenus dans le végétal se retrouvent intégralement dans la cendre. Cette méthode est couramment utilisée pour doser les éléments minéraux totaux renfermés dans une plante.

Si on considère que 100 cm<sup>3</sup> de l'horizon de racines grossières se réduisent à 14 cm<sup>3</sup> de cendres humides \*\*, on peut réaliser le calcul suivant :

100 cm<sup>3</sup> de l'horizon de racines grossières humides contiennent :

2,2 milliéquivalents de CaO  
 1,2 milliéquivalents de MgO  
 0,5 milliéquivalents de K<sub>2</sub>O \*\*\*.

\* Voir page 133.

\*\* Voir tableau page 127.

\*\*\* Voir figure 43.

Ces éléments se retrouveront intégralement dans les 14 cm<sup>3</sup> de cendres, ce qui représente :

$$\frac{2,2 \times 100}{14} = 15,6 \text{ mé de CaO pour } 100 \text{ cm}^3 \text{ de cendres,}$$

$$\frac{1,2 \times 100}{14} = 8,5 \text{ mé de MgO,}$$

$$\frac{0,5 \times 100}{14} = 3,5 \text{ mé de K}_2\text{O.}$$

Ces chiffres montrent nettement que l'horizon cendreux, dérivé de l'horizon de racines grossières, est riche en bases totales. Aucune valeur aussi élevée n'a encore été rencontrée dans les divers horizons pris en considération dans cette étude.

Un raisonnement analogue fait pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> donne :

$$\frac{0,3 \times 100}{14} = 2,1 \text{ g de P}_2\text{O}_5 \text{ pour } 100 \text{ cm}^3 \text{ de sol *.}$$

L'acide phosphorique total est donc également fort.

Le dosage des bases totales dans la partie aérienne des *Cyperus emyrensis*, puis dans l'horizon de racines grossières du stade I donne les résultats suivants :

|                                                             | Milliéquivalents pour 100 g d'échantillon sec |     |                  | Poids de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub><br>pour 100 g<br>d'échantillon sec |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                                                             | CaO                                           | MgO | K <sub>2</sub> O |                                                                           |
| Partie aérienne de <i>Cyperus emyrensis</i> non brûlée .... | 12                                            | 9   | 12               | 0,15 g                                                                    |
| Horizon de racines grossières non brûlé ** .....            | 11                                            | 6   | 2,5              | 0,15 g                                                                    |

Ainsi, une combustion également poussée de ces deux échantillons donne pour la partie aérienne de *Cyperus emyrensis* une cendre plus riche que celle dérivée de l'horizon de racines grossières. La différence est surtout marquée pour K<sub>2</sub>O.

## STADE II

Les *Cyperus latifolius* sont aussi riches en bases totales et en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total que les *Cyperus emyrensis*.

### F) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

#### STADE I

Le graphique de la figure 58 rappelle la courbe de neutralisation correspondant à l'horizon de surface non brûlé et donne celle correspondant à la cendre obtenue par combustion de cet horizon \*\*\*.

L'incendie augmente donc nettement le pH qui devient voisin de 6 et il diminue le pouvoir tampon.

Un résultat analogue est obtenu lorsque l'horizon de débris de racines brûle.

#### STADE II

Le feu a encore tendance à accroître la valeur du pH et à diminuer le pouvoir tampon.

\* Voir figure 44.

\*\* Voir figure 42.

\*\*\* Voir figure 45.

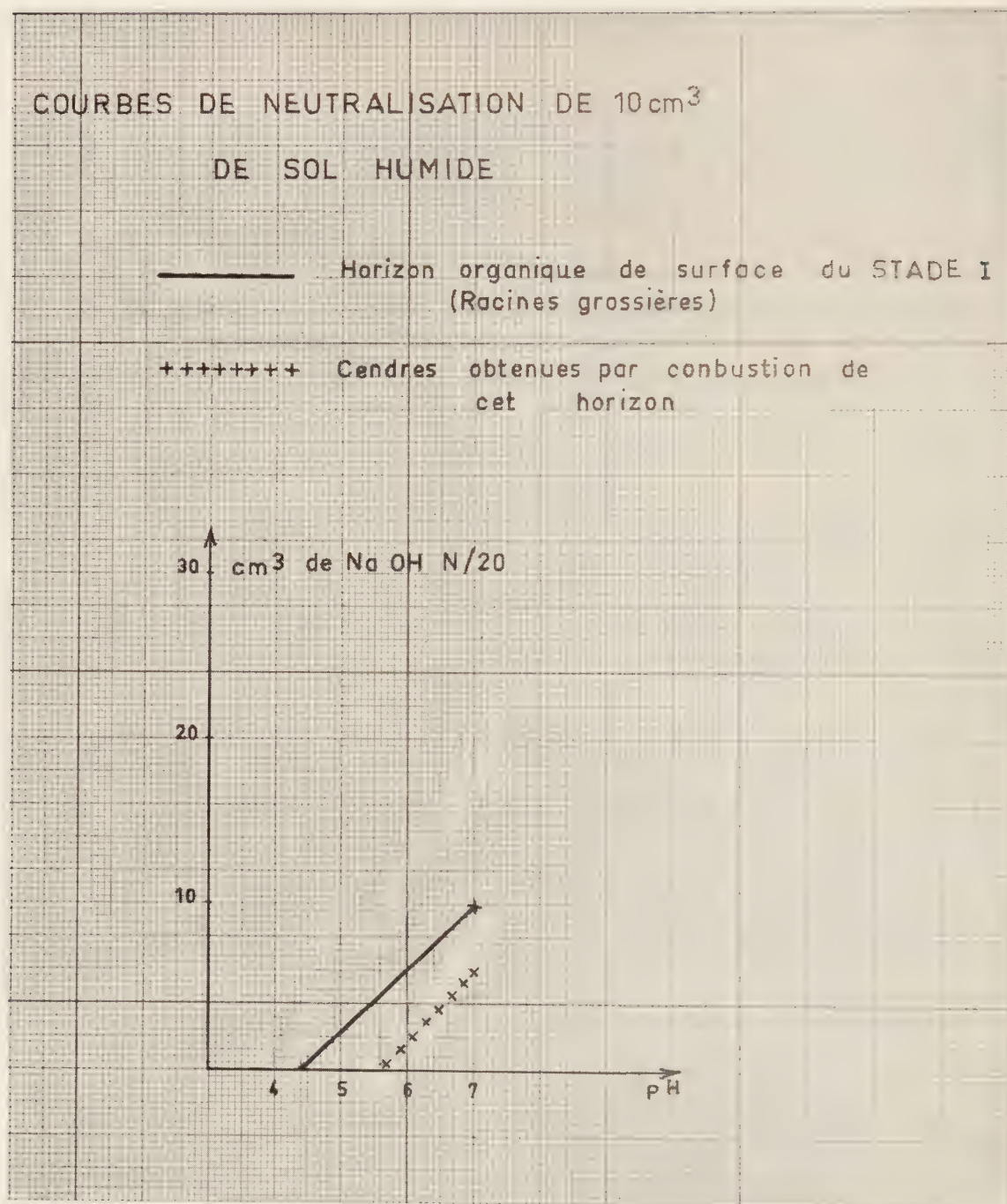


Figure 58



## G) CARACTERES PHYSIQUES CONCERNANT LES RELATIONS SOL-EAU

## EAU UTILE ET RESERVE EN EAU

## STADE I

Le graphique de la figure 59 rappelle les valeurs de l'eau utile pour l'horizon de racines grossières, non brûlé, et donne les valeurs de l'eau utile pour la cendre provenant de la combustion de ces racines grossières.

Il apparaît que le brûlage diminue considérablement l'eau utile, malgré des teneurs encore assez élevées en matières organiques. Cela s'explique par la nature charbonneuse des matières organiques et par la forte dessiccation de l'échantillon. Cette dessiccation est difficilement réversible, plus encore que pour les tourbes non brûlées.

La réserve en eau pour 10 cm de sol, qui est de  $138 \times 0,2 = 28$  mm dans un horizon de racines grossières n'ayant jamais été asséché, passe, dans la cendre, à  $30 \times 0,5 = 15$  mm si nous la calculons à partir de l'humidité à pF 3 et à 17,5 mm si nous adoptons l'humidité à pF 2,5.

Ces valeurs sont les plus basses de toutes celles observées depuis le début de cette étude \*.

L'irrigation d'une cendre doit en conséquence être particulièrement bien conduite, car son assèchement rapide provoque, dans de brefs délais, le flétrissement des végétaux poussant sur elle.

Les figures 60 et 60 bis montrent qu'avec une irrigation défectueuse le riz, uniformément semé sur toute la surface du sol, ne se développe que dans les contrebas qui se déshydratent moins vite que leurs bordures.

Les cendres dérivées des végétaux vivants ont des caractères analogues à ceux qui viennent d'être énoncés.

## STADE II

La tendance reste la même, mais les effets sont moins marqués.

## PERMEABILITE ET PLASTICITE

## STADE I

|               |                                              | Perméabilité<br>(volume d'eau écoulé en 1 h.)<br>(cm <sup>3</sup> ) | Plasticité |
|---------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| Stade I ..... | Racines grossières .....                     | 250                                                                 | Nulle      |
|               | Cendres dérivées de racines grossières ..... | 150                                                                 | Faible     |

Le feu diminue la perméabilité qui reste toutefois bonne. Il a tendance à donner une légère plasticité.

Les cendres dérivées de végétaux vivants présentent des caractères analogues.

## STADE II

Les cendres dérivées des *Cyperus latifolius* sont un peu plus perméables que l'horizon de surface tourbeux pour lequel nous avons enregistré un écoulement de 100 cm<sup>3</sup> d'eau en une heure.

La plasticité de ces cendres est inférieure à celle de l'horizon tourbeux de surface.

Résumé de l'action sur les caractères analytiques des incendies se propageant sur le marais :

Enrichissement relatif de la fraction minérale.

Formation de cendres partielles à partir des végétaux vivants et des tourbes non dépourvues en éléments organiques.

Destruction des micro-organismes.

Enrichissement du milieu en bases échangeables et totales qui sont sensibles aux lessivages à l'eau.

Destruction par le feu des matières organiques colloïdales et cuisson des argiles entraînent un abaissement de la capacité d'échange totale.

Élévation du pH des cendres et diminution du pouvoir tampon.

Abaissement des réserves en eau au point qu'une surveillance étroite de l'irrigation des cendres s'impose.

\* Voir tableau page 116.

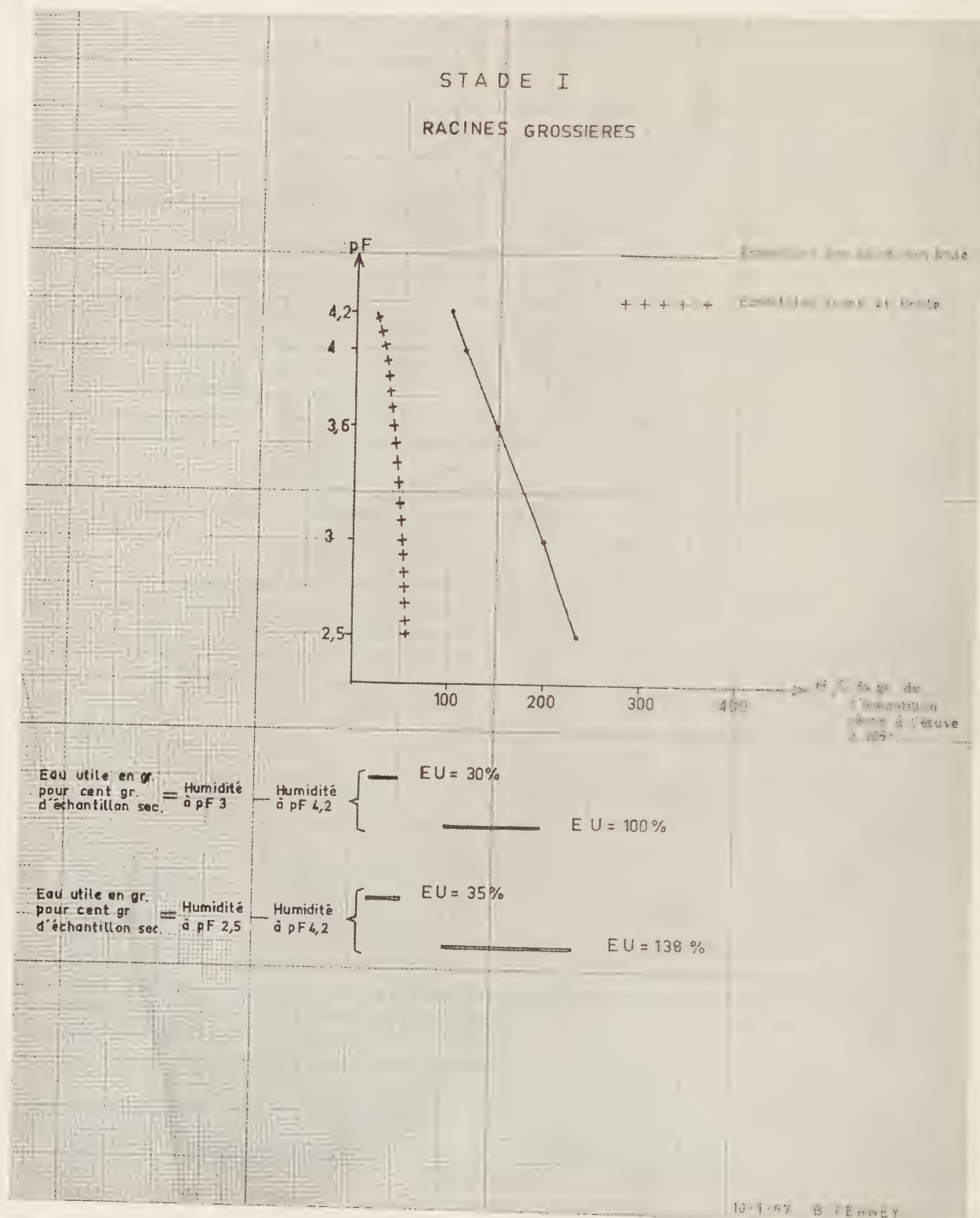


Figure 59

Fig. 60 et 60 bis

DESSICCATION DES HORIZONS CENDREUX

(Lac Alaotra)





#### IV) REPERCUSSION DU BRULAGE SUR LES EROSIONS

Nous avons vu que le feu décape les tourbes soumises au drainage et que les cendres produites possèdent des caractères physico-chimiques et biologiques bien particuliers, capables d'influencer largement l'aptitude culturale du sol.

Nous verrons que les horizons cendreux sont très sensibles à l'érosion qui peut conduire rapidement à leur disparition totale.

##### 1) EROSION EOLIENNE

Elle commence à intervenir au moment du brûlage, car le mouvement ascensionnel de l'air chaud soulève les cendres qui sont entraînées par les vents à plusieurs kilomètres de leur lieu de formation (fig. 61 et 61 bis).

Elle se poursuit après l'incendie, jusqu'à la saison des pluies, pendant une durée allant de un à deux mois.

Pendant cette période, la cendre, très sèche puisque non soumise à l'influence de la nappe phréatique, est érodée par des tourbillons qui se forment sur le marais, aux heures les plus chaudes de la journée. Ils sont violents et se matérialisent par des colonnes de cendres hautes de plusieurs dizaines de mètres, d'un rayon de base variant de 5 à 10 m, se déplaçant à une vitesse de 10 à 20 km à l'heure (fig. 62 et 62 bis).

Ces tourbillons aspirent la cendre en passant sur la zone brûlée et continuent à être efficaces en traversant les zones non brûlées. La cendre est donc maintenue en suspension jusqu'au moment où la vitesse de rotation diminue. Elle retombe alors sur le sol, généralement très loin de son origine.

Cette forme d'érosion est importante puisque les tourbillons sont nombreux et se succèdent les uns les autres.

##### 2) EROSION PAR LES EAUX

Les cendres partielles obtenues sur le marais sont légères et soufflées. Lorsque la nappe phréatique remonte rapidement, elles se mettent à flotter n'étant pas encore hydratées. Elles sont ainsi entraînées par les courants obliques vers le centre des dépressions et passent parfois par les déversoirs.

L'examen à la loupe binoculaire et l'analyse chimique de l'horizon sous-jacent aux horizons cendreux montrent que les cendres ne descendent guère dans le profil.

Les résidus de la combustion, susceptibles d'être entraînés par les eaux sur les plus grandes distances, sont constitués de débris organiques dans lesquels les flammes ont détruit l'intérieur des cellules mais épargné partiellement les membranes. Ces débris, remplis d'air, sont de véritables flotteurs qui ne s'imbibent que très lentement.

Ainsi, une couche charbonneuse rencontrée dans un profil tourbeux peut signifier que les bords de la cuvette ont été brûlés puisque les débris charbonneux ont été transportés par les eaux jusqu'au profil pris en considération.

Dans un périmètre drainé, lorsque les drains ne débouchent pas dans une zone en eau possédant des déversoirs efficaces, l'extrémité de ces drains est peu fonctionnelle. Cela permet aux produits de la combustion de s'accumuler et de colmater peu à peu les drains (fig. 63 et 63 bis).

Pour éviter de faire flotter une cendre, il convient de l'humidifier par la surface et progressivement. L'établissement de diguettes freine les courants obliques de la nappe et maintient ainsi la cendre sur place.

Les érosions dues aux vents et aux eaux ont ensemble une telle vigueur que, sans précautions spéciales, la transformation en cendres d'un horizon tourbeux correspond à une perte totale du matériau originel.

Fig. 61 et 61 bis

FEU ET EROSION EOLIENNE

(Lac Alaotra)

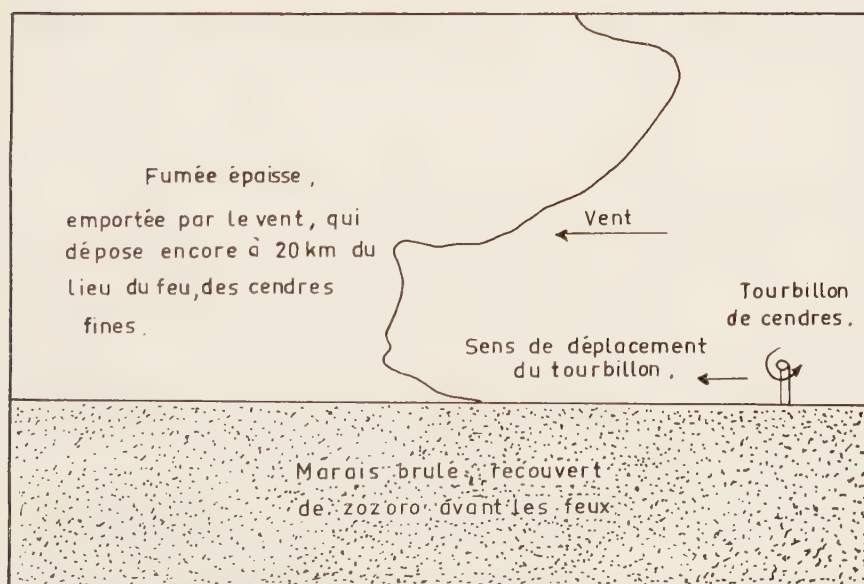
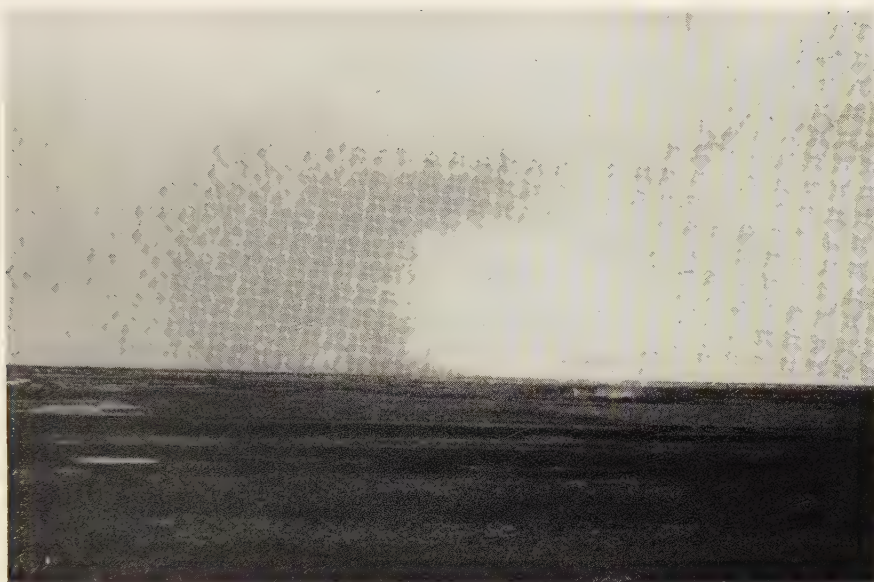


Fig. 62 et 62 bis

TOURBILLONS SUR MARAIS BRULÉ

(Lac Alaotra)

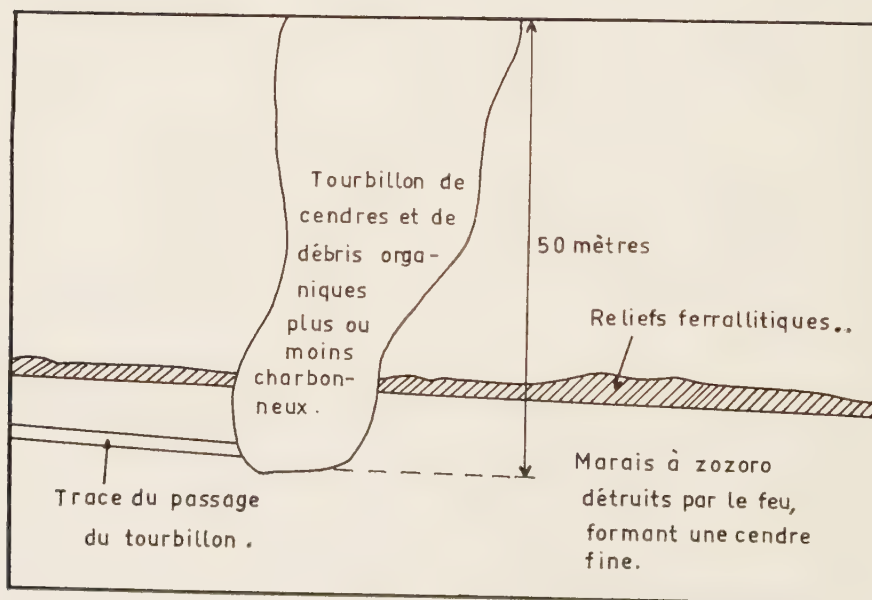
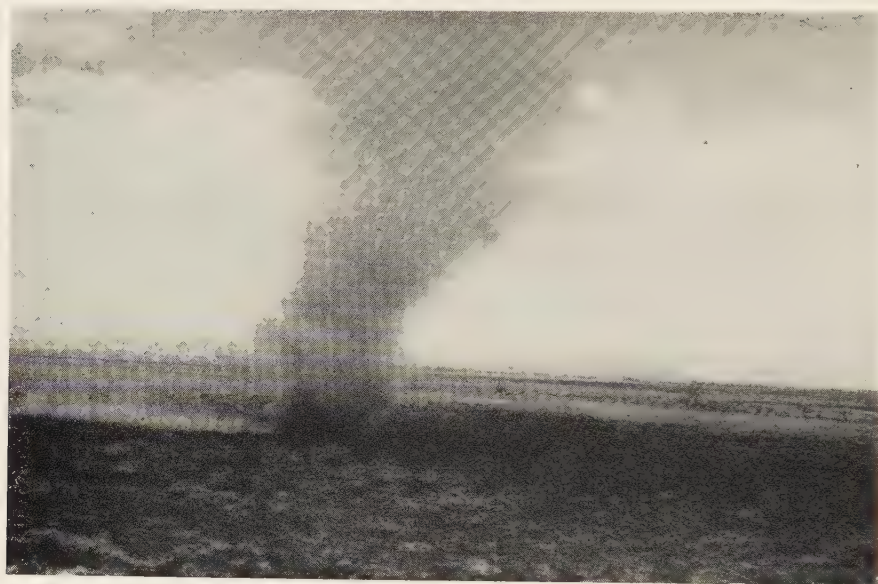
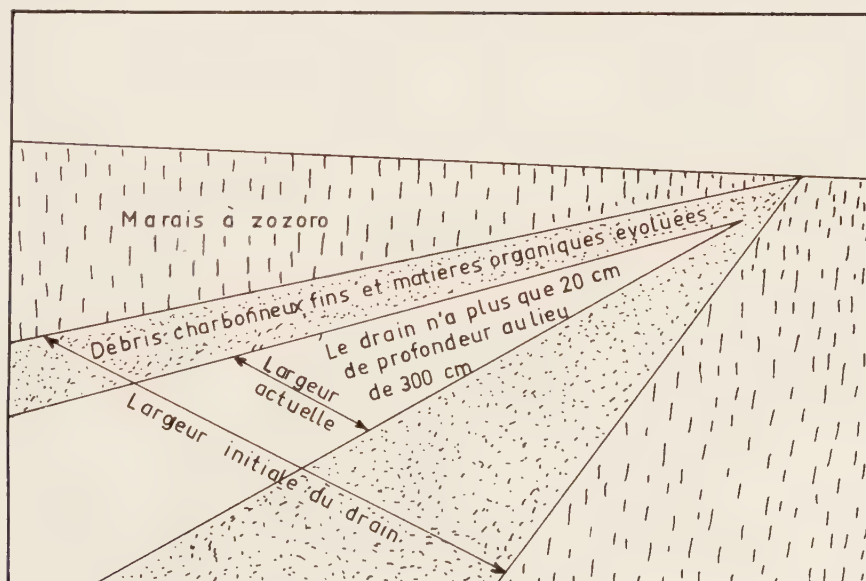




Fig. 63 et 63 bis

MATIERES ORGANIQUES ALLUVIONNEES COMBLANT UN DRAIN

(Lac Alaotra)



## V) CONCLUSION SUR L'EVOLUTION A BREVE ECHEANCE

Nous allons reprendre, en les résumant, les conséquences essentielles de cette évolution qui intervient de manière particulièrement active sur les tourbes au stade I.

### 1) CONSEQUENCES SUR LA MORPHOLOGIE DU PROFIL

Le feu, au stade I, fait disparaître l'horizon de racines grossières et souvent une partie de l'horizon de débris de racines.

Le décapage a lieu, généralement, par tranches successives, correspondant à des améliorations dans le temps du système de drainage. Il provoque un abaissement considérable de la surface du sol.

Au stade II, la combustion intéresse davantage la végétation, constituée de *Cyperus latifolius*, que le sol lui-même. Toutefois, des brûlages répétés amenuisent le sol.

### 2) CONSEQUENCES SUR LES CARACTERES PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES

Enrichissement relatif de la fraction minérale, constituée de limon et d'argile, par disparition des éléments organiques.

Diminution des stocks organiques. Toutefois, l'expression des résultats analytiques par rapport à une unité de volume montre que les cendres, qui sont partielles, ne sont pas démunies en éléments organiques et tout particulièrement en azote total.

L'incendie stérilise les sols mais les cendres, lorsqu'elles sont réensemencées, constituent un milieu favorable à la vie microbienne.

La qualité essentielle des cendres est leur richesse en éléments minéraux qui sont malheureusement sensibles au lessivage par les eaux.

Les cendres ont une faible réserve en eau et sont perméables.

### 3) CONSEQUENCES SUR L'EROSION

Les produits de combustion sont soumis à une érosion intense par les vents et les eaux, érosion qui provoque leur disparition rapide de la surface du sol. L'entraînement se réalise obliquement et l'on peut dire que, pratiquement, les cendres ne pénètrent pas dans le profil.

## CONCLUSION D'ENSEMBLE SUR L'EVOLUTION A LONGUE ET A BREVE ECHEANCE PUIS CLASSIFICATION PEDOLOGIQUE DES DIVERS STADES EVOLUTIFS ETUDIES

### 1) CONCLUSION

L'évolution à longue échéance entraîne progressivement \* :

- un tassement considérable du profil initial, atteignant plusieurs mètres ;
- une forte augmentation de la densité apparente ;
- un enrichissement relatif en argile et en limon ;
- une amélioration de l'activité microbienne ;
- un abaissement du rapport C/N et des perméabilités, à l'origine excessifs ;
- une augmentation de la plasticité, qui devient très forte ;
- une diminution légère de l'acidité du milieu et de son pouvoir tampon.

---

\* Voir page 118 et suivantes.

Elle provoque en surface des profils, lorsque les résultats analytiques sont exprimés par rapport à une unité de volume de sol humide, une élévation puis une décroissance :

- de l'azote total ;
- des acides humiques et des taux d'humification ;
- de la capacité d'échange totale du complexe absorbant et de la somme des bases échangeables ;
- des réserves en eau.

Les valeurs les plus élevées obtenues correspondent au profil ayant atteint le stade II.

Ce profil présente, de plus, en surface, les meilleures perméabilités et plasticités. Enfin, il a une activité microbienne et des réserves en bases intermédiaires entre celles obtenues pour les stades extrêmes. Le profil au stade II présente ainsi des caractères devant lui conférer une bonne aptitude culturale. Par contre, les sols peu évolués, ou trop évolués, paraissent moins favorables à la mise en culture.

L'évolution à brève échéance entraîne brusquement :

- un tassement important ;
- une augmentation de la densité apparente ;
- un enrichissement relatif de la fraction minérale ;
- une nette diminution du rapport C/N, mais une chute non excessive des éléments organiques exprimés par rapport à un volume de cendre humide ;
- une forte augmentation en bases échangeables, en bases totales et en  $P_2O_5$  total ;
- une chute de l'acidité et du pouvoir tampon ;
- une diminution des réserves en eau et des perméabilités.

Il est permis de penser que les cendres obtenues par combustion incomplète des tourbes, encore assez pourvues en éléments organiques et particulièrement riches en éléments minéraux, peuvent assurer une bonne nutrition aux végétaux se développant sur elles, à la condition de recevoir une irrigation régulière.

Il doit en être de même pour les cendres provenant de la combustion des Cypéracées qui constituent la végétation spontanée des stades I et II. Elles ont, en effet, une nature voisine de celles dérivées de tourbes.

L'ensemble des résultats obtenus montre que, lorsqu'une tourbe est soumise au drainage et qu'elle est parcourue par les incendies, elle passe par un stade semi-évolué (stade II) qui présente les caractères analytiques les plus favorables à la culture. Ces résultats indiquent aussi que toute combustion sur le marais de Cypéracées ou de tourbes dérivées de ces Cypéracées fournit un horizon cendreux, riche chimiquement, devant assurer aux végétaux une bonne alimentation minérale.

Avant d'aborder les méthodes d'utilisation des tourbes en agriculture, il convient de vérifier par des essais cultureux, réalisés en vases de végétation et en cases lysimétriques, les pronostics concernant les aptitudes culturales basés sur des résultats analytiques.

Ces tests cultureux feront l'objet du chapitre III qui débutera après que l'on aura situé les tourbes plus ou moins évoluées dans les classifications pédologiques.

## 2) CLASSIFICATION PEDOLOGIQUE

Prenons en considération la classification française présentée à Gand en 1962 pour montrer les différentes places que peut occuper un sol tourbeux au cours de son évolution par drainage.

Le sol tourbeux au « stade I » fait partie :

- de la Classe des sols hydromorphes ;
- de la Sous-classe des sols tourbeux ;
- du Grand groupe des tourbes oligotrophes.

Soumis au brûlage partiel, il conserve le même classement.



Après évolution à longue échéance, lorsque le sol atteint le stade II, il a perdu sa structure fibreuse, ses matières organiques sont moins abondantes et constituent un mélange intime avec l'argile. Ces transformations font que le profil, comme le « sol semi-tourbeux », appartient à :

- la Classe des sols hydromorphes ;
- la Sous-classe des sols semi-tourbeux ;
- le Grand groupe des sols à Anmor.

Lorsque le stade III est atteint, le sol est voisin du « sol à gley réduit », en ce qui concerne les taux et l'état des matières organiques. De plus, le gley n'est pas toujours assez drainé pour présenter des taches nettes et devenir un pseudogley. Le stade II se place donc dans :

- la Classe des sols hydromorphes ;
- la Sous-classe des sols minéraux à réduction partielle du fer ;
- le Groupe des sols à gley ou, si le drainage est meilleur, dans le Groupe des « sols à pseudogley de profondeur ».

Lorsque le stade II est dépassé, que le sol, parfaitement drainé, n'est plus irrigué, nous ne pouvons plus l'intégrer à la Classe des « sols à profils peu différenciés » à laquelle appartiennent les « sols marmorisés ». Le sol évoluant dans des conditions favorables à la ferrallitisation, nous le classerons avec les sols ferrallitiques, en soulignant toutefois ses antécédents relatifs à son alluvionnement et à sa période d'hydromorphie.

Ainsi, la classification française permet non seulement l'intégration des sols plus ou moins hydromorphes, mais aussi celle des stades évolutifs d'une tourbe drainée. Elle présente l'avantage de grouper des sols qui ont des positions géographiques voisines, et parfois même strictement identiques.

Si la mise en place, des divers stades évolutifs, dans la classification prise en considération n'entraîne pas de difficulté, il importe de faire une distinction entre un « sol semi-tourbeux » appartenant à la chaîne des sols hydromorphes et une « tourbe au stade II », parce que non seulement les profils sont morphologiquement différents \*, mais de plus ils présentent des caractères analytiques parfois disparates.

Lors de la cartographie pédologique des sols de marais, il convient donc, dans la légende, de faire, à un niveau plus bas que celui du Sous-groupe, une distinction amenant l'utilisateur à savoir si un profil mis dans la Sous-classe des semi-tourbeux et le Grand groupe des sols à Anmor n'a jamais dépassé ce degré d'hydromorphie ou s'il correspond à un sol tourbeux drainé.

En effet, non seulement les aptitudes culturales au moment de l'établissement de la carte peuvent varier de l'un à l'autre sol dans des limites assez larges, mais encore, le sens de l'évolution étant différent et les transformations rapides, les caractères divergeront de plus en plus à mesure que la carte prendra de l'ancienneté.

Un raisonnement analogue doit avoir lieu en considérant un « sol à gley réduit » et un « sol tourbeux au stade II ».

---

\* Voir page 70.

## CHAPITRE III

# INFLUENCE DE L'EVOLUTION, PROVOQUEE PAR DRAINAGE, DU SOL LE PLUS HYDROMORPHE DE LA CHAÎNE SUR SON APTITUDE A NOURRIR LES VEGETAUX

Le premier chapitre a souligné que les « sols à gley réduit » et les « sols semi-tourbeux », qui prennent naissance avec une hydromorphie moyennement poussée, présentent, en surface, les meilleurs caractères analytiques concernant les éléments organiques contenus dans une unité de volume de terre humide et les plus fortes valeurs relatives à la capacité d'échange totale.

En plus de ces avantages intervenant favorablement sur les aptitudes culturales, ces terres possèdent, dans les conditions naturelles, une phase d'ennoyage de leur surface propice à la riziculture noyée. Elles sont donc tout particulièrement recherchées par le riziculteur qui évite ainsi l'irrigation indispensable sur les sols moins hydromorphes et, à la fois, le drainage et l'irrigation en sols trop hydromorphes.

Toujours dans ce premier chapitre, il a été noté que le matériau alluvionné, constituant l'essentiel des « sols marmorisés », présente généralement une richesse toute particulière en bases échangeables, entraînant, comme il est indiqué par la suite, une bonne fertilité. Ces terres peu hydromorphes échappent souvent à la riziculture, d'une part, parce que leur irrigation est difficile à cause de leur topographie accidentée, et, d'autre part, parce qu'elles peuvent porter des cultures sèches assurant un meilleur revenu par hectare cultivé. Il convient donc d'affecter à la riziculture les sols moyennement et très hydromorphes.

La mise en rizières des sols moyennement hydromorphes est de règle absolue, mais il en est autrement pour les tourbes, dont l'utilisation est généralement récente. L'exploitation des tourbes exige la mise en œuvre de puissants moyens mécaniques, qui entraîne un fort investissement financier dont la rentabilité est souvent aléatoire.

En effet, on s'aperçoit que les rendements agricoles varient plus ou moins rapidement avec le temps, compté à partir de la mise en fonction du réseau de drainage, pour aboutir, dans les cas les plus défavorables, à une improduction telle que l'abandon des terres semble souhaitable.

Le problème des fluctuations, consécutives au drainage, du potentiel agricole d'une tourbe apparaît donc comme essentiel, au double point de vue scientifique et pratique.

La mise en place des canaux de drainage et d'irrigation, ainsi que des barrages de retenue pour assurer l'alimentation en eau, ne peut être amortie que si la production se maintient pendant de nombreuses années à un niveau élevé.

L'examen des résultats obtenus jusqu'à ce jour, dans les champs ou les casiers expérimentaux, ne permet pas d'isoler le rôle du sol sur les fluctuations du potentiel agricole. Ce rôle étant mal connu, il est difficile de chercher un remède pour stabiliser les rendements.

L'action du sol reste à définir parce que, dans les expérimentations menées jusqu'à ce jour, lorsque le facteur sol varie, d'autres facteurs influençant largement les rendements varient aussi. Ce sont, par exemple : les conditions d'irrigation, les techniques culturales, les attaques parasitaires, les choix variétaux.

C'est pour pallier ces inconvénients que sont entreprises les expériences culturales décrites plus loin, pour lesquelles le principe essentiel est de **fixer à un certain niveau, favorable à la production, tous les facteurs influençant les rendements, à l'exception de l'un d'entre eux**, dont les effets sont étudiés en faisant varier son action.

Avant de préciser le rôle exclusif de la nature du sol sur les rendements, deux expériences sont réalisées pour montrer que **les mauvaises techniques d'irrigation perturbant l'alimentation en eau du végétal ont des conséquences plus ou moins graves sur les rendements, en fonction du type de sol pris en considération**.

Ceci revient à dire que, lorsque l'irrigation est strictement la même mais pas toujours satisfaisante, pour deux types de sols, les différences de rendements obtenus ne sont que partiellement dues à l'aptitude des sols à assurer l'alimentation minérale de la plante.

Le rôle de la nature du sol non fumé sur les rendements agricoles sera précisé en veillant à ce que les facteurs influençant la production agissent de manière égale quel que soit le type de sol et soient réglés pour obtenir une production maximale.

Les conditions d'irrigation, dont l'action est essentielle en riziculture, seront maintenues bonnes.

L'alimentation minérale à partir d'un sol non fumé mérite d'être étudiée, car elle atteint des niveaux satisfaisants, qui sont dus principalement à la minéralisation progressive et rapide du stock organique et à la présence constante dans les eaux d'irrigation de limon et d'argile, d'éléments pseudo-solubles, d'éléments solubles.

Les apports de fertilisants dont le rôle bénéfique sur les rendements est certain, mais dont la rentabilité est à préciser, doivent être définis dans leur forme et leur volume, non seulement compte tenu de l'état du sol au moment où ils sont effectués, mais aussi compte tenu du sens de la variation des éléments pris en considération, définis par l'évolution.

La bibliographie donne des résultats d'essais d'engrais, concernant presque exclusivement des sols ayant dépassé le stade II et très généralement le stade III.

Avant d'aborder le premier paragraphe de ce chapitre, soulignons que tous les essais culturaux qui vont suivre sont conduits soit en vases de végétation, soit en cases lysimétriques, en utilisant la variété de riz « Makalioka 34 » qui est très productive, très répandue dans la région du Lac Alaotra et rustique.

### 1) ALIMENTATION EN EAU DU VEGETAL

Il sera précisé, en premier lieu, l'aptitude que possède le riz à résister à la sécheresse sur diverses terres. Une bonne résistance lui permet, lorsque le défaut d'irrigation ne se prolonge pas excessivement, de ne pas flétrir et d'éviter les fortes baisses de rendement.

Ensuite, sera étudiée l'influence de la hauteur de la nappe d'eau, mesurée par rapport à la surface du sol, sur les rendements en fonction de la nature du sol.

#### A) RESISTANCE A LA SECHERESSE LIEE A LA NATURE DU SOL

Lorsque l'irrigation cesse, le riz résiste plus ou moins longtemps avant de flétrir et de mourir. Cette résistance est fonction du sol qui intervient par ses qualités physiques, dont la principale est l'aptitude à stocker une eau utilisable par le végétal. Il intervient ensuite par sa valeur culturale. En effet, s'il donne une forte végétation, recouvrant intégralement le sol, l'évapotranspiration potentielle sera intense et l'assèchement rapide. Dans le cas contraire, l'assèchement sera plus lent.

Soulignons que, lorsque la végétation recouvre intégralement le sol, quelle que soit sa taille et quelle que soit sa densité, l'évapotranspiration reste sensiblement la même. A ce niveau donc, la richesse chimique du sol n'intervient plus, ou très peu, sur la résistance à la sécheresse.

#### 1) METHODES D'EVALUATION DE LA RESISTANCE A LA SECHERESSE DU RIZ

Les tests en vases de végétation sont effectués dans des pots cylindriques en zinc, fabriqués par la maison « Galva Quimrer »\*. Ces pots ont les dimensions suivantes : 24 cm de diamètre et 25 cm de hauteur. Ils sont munis d'un tube de 1,5 cm de diamètre, placé contre la paroi en zinc, allant de la surface à la base du cylindre, et qui permet un arrosage de bas en haut. A leur partie inférieure, on a prévu un robinet de drainage.

Les pots sont emplis avec de la terre provenant d'un des horizons des profils étudiés, de la manière suivante :

- emplissage avec de la terre humide ;
- arrosage pour gorger le sol d'eau ;
- élimination de l'excès de terre pour libérer les cinq premiers centimètres de la partie supérieure du vase ;
- établissement et maintien d'une nappe d'eau à 3 cm au-dessus du niveau de la terre.

Les pots sont placés dans un abri couvert de feuilles de plastique transparent, dont les murs sont en grillage métallique à maille fine, impénétrable aux insectes (fig. 64). Chaque pot est repiqué avec 6 plants de riz âgés de 1 mois et demi provenant d'une bonne pépinière.

\* Voir figures 64 et 65.



Fig. 64 et 65

ESSAIS EN VASES DE VEGETATION

(Station Agronomique du Lac Alaotra)



Fig. 64. — Abri où sont effectuées les cultures en vases de végétation.



Fig. 65. — Les vases remplis, de gauche à droite, avec :

l'horizon de racines grossières (stade I) ;  
 les cendres provenant de la combustion de l'horizon de surface du stade I ;  
 l'horizon de débris de racines (stade I) ;  
 l'horizon de matières organiques fines (stade I) ;  
 l'horizon de gley limoneux, du stade III,

portent un riz repiqué depuis deux mois.

Pour favoriser l'oxygénation du milieu de culture, en plus du remplacement de l'eau évaporée dans les pots qui se réalise à partir de la base de la terre avec une eau aérée, on vidange au bout de trois semaines puis on rétablit immédiatement le niveau normal de la nappe.

Lorsque la plantule est repiquée depuis 1 mois et demi, un drainage définitif et total est réalisé et l'époque de flétrissement des végétaux est notée.

## 2) RESULTATS OBTENUS

Le tableau qui suit résume les résultats acquis et rappelle :

la perméabilité de chaque horizon étudié, qui facilite le ressuyage des pots au moment du drainage (dans les conditions de l'expérience, compte tenu de la faible épaisseur du sol, le ressuyage est dans tous les cas rapide) ;

la réserve en eau des terres.

Il donne aussi une appréciation sur l'envergure du développement végétatif qui, dans les conditions de l'expérience, influence largement la valeur de l'évapotranspiration. En effet, BERNARD a montré que, lorsque les végétaux débordent à l'extérieur de la zone sur laquelle ils se développent, l'évapotranspiration augmente au point de presque tripler.

| Stade évolutif          | Nature de l'échantillon                                              | Caractères physiques                                    |                                          | Appréciation sur le développement de la végétation en ne tenant compte que des fortes différences | Temps compté à partir du jour du drainage des vases jusqu'au moment où les plants flétrissent | Appréciation sur la résistance à la sécheresse dans les conditions de l'expérience |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
|                         |                                                                      | Perméabilité (cm <sup>3</sup> d'eau écoulés en 1 heure) | Réserve en eau pour 10 cm de sol (en mm) |                                                                                                   |                                                                                               |                                                                                    |
| Stade I                 | Cendre provenant de la combustion de l'horizon de racines grossières | 150                                                     | 15                                       | Très développée.                                                                                  | Moins d'une semaine.                                                                          | Faible.                                                                            |
|                         | Racines grossières.                                                  | 250                                                     | 28                                       | Développement moyen sur l'ensemble de ces horizons.                                               | Une à deux semaines.                                                                          | Moyenne à bonne.                                                                   |
|                         | Débris organiques.                                                   | 200                                                     | 60                                       |                                                                                                   | Trois semaines et plus.                                                                       | Très bonne.                                                                        |
|                         | Matières organiques fines.                                           | 100                                                     | 65                                       |                                                                                                   |                                                                                               |                                                                                    |
| Stade II                | Horizon de surface                                                   | 100                                                     | 40                                       |                                                                                                   |                                                                                               |                                                                                    |
| Stade III               | Horizon organique.                                                   | 70                                                      | 22                                       |                                                                                                   | Une à deux semaines.                                                                          | Moyenne à bonne.                                                                   |
|                         | Horizon non organique.                                               | 30                                                      | 19                                       |                                                                                                   |                                                                                               |                                                                                    |
| Alluvion fluviale ..... |                                                                      | 30                                                      | 19                                       | Très développée.                                                                                  | Moins d'une semaine.                                                                          | Faible.                                                                            |

## 3) INTERPRETATION DES RESULTATS

Le tableau indique que le riz poussant sur « cendre » et sur « alluvion fluviale » est le premier à flétrir. Cette sensibilité particulière à l'assèchement est liée aux réserves en eau peu élevées de ces horizons et aussi un fort développement végétatif qu'a le riz.

En plein champ, les plants étant serrés les uns contre les autres, le temps de flétrissement doit devenir moyen.

Les échantillons particulièrement riches en matières organiques non excessivement grossières (stade I : débris de racines et horizon constitué de matières organiques fines : stade II : horizon de surface) permettent la meilleure résistance à la sécheresse. C'est donc sur eux que les chutes de rendement, consécutives à des irrigation par à-coups, seront les moins marquées.

Tout brûlage, abaissant les réserves en eau du sol, impose une surveillance plus étroite des irrigations. Celles-ci doivent être particulièrement bonnes au cours de la montaison et de l'épiaison, périodes pendant lesquelles, selon NOBURU-YAMADA, le riz a le plus besoin d'eau.

Ce même Auteur signale que les mises à sec rapides des rizières sont bénéfiques aux rendements, tout particulièrement lorsqu'elles ont lieu entre le repiquage et l'épiaison qui correspond à la période la plus active du système racinaire. Ces assèchements, efficaces surtout en sols organiques dans lesquels les acides sulfhydriques, butyriques et acétiques sont abondants et toxiques aux racines, doivent être menés dans les délais d'autant plus brefs que les réserves en eau du sol sont faibles.

Soulignons que, pendant la saison chaude, un assèchement provoque un rapide échauffement de la surface de la rizière. En effet, il n'y a plus d'évaporation utilisant une partie de l'énergie calorifique et il y a un ralentissement de la propagation en profondeur de la chaleur. Les échauffements provoquent des nécroses des tissus avant même que le point de flétrissement soit atteint.

Ces résultats montrent que le profil au stade II est celui qui groupe, de 0 à 50 cm de profondeur, les horizons offrant au riz la meilleure résistance à la sécheresse. C'est donc pour ce degré d'évolution que les irrigations mal suivies seront le moins préjudiciables aux rendements. Cette constatation renforce la valeur agricole de ce sol.

## B) INFLUENCE SUR LES RENDEMENTS DE LA HAUTEUR DE LA NAPPE RECOUVRANT UN SOL

Prenons en considération deux horizons :

l'un constitué de cendres provenant de la combustion d'une tourbe au stade I, donnant une haute végétation ;

l'autre correspondant à l'horizon de surface d'une tourbe au stade I (horizon de racines grossières), donnant une végétation plus basse.

### 1) METHODE UTILISEE

Emplissons trois vases de végétation avec chacune des terres provenant de ces horizons (soit 6 vases en tout).

Réglons, pour tous, les nappes à 3 cm au-dessus du sol (niveau + 3).

Repiquons 6 plants par vase et laissons le riz se développer avec une nappe de 3 cm, pendant un mois et demi.

Les plants étant bien développés, modifions ainsi les niveaux de nappe et maintenons-les ensuite égaux à eux-mêmes :

premier vase : nappe à 15 cm au-dessous de la surface du sol ;

deuxième vase : nappe à 3 cm au-dessus de la surface du sol ;

troisième vase : nappe à 25 cm au-dessus de la surface du sol (pour réaliser cela, nous plaçons sur tous les vases une rallonge cylindrique de mêmes dimensions que le vase).

Compte tenu de la variété utilisée, les modifications de niveau de nappe interviennent avant l'initiation florale, vers la fin du tallage.

### 2) RESULTATS OBTENUS

En prenant pour témoin les vases ayant, tout au long de la culture, une nappe à + 3 cm, nous pouvons résumer ainsi les résultats obtenus concernant les rendements en paddy :

| Niveau de l'eau par rapport à la surface du sol | Cendres provenant de la combustion de racines grossières | Racines grossières                            |
|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| — 15                                            | Très mauvais rendement par rapport au témoin.            | Très mauvais rendement par rapport au témoin. |
| + 3                                             | Témoin.                                                  | Témoin.                                       |
| + 25                                            | Rendement analogue à celui du témoin.                    | Mauvais rendement par rapport au témoin.      |

### 3) INTERPRETATION DES RESULTATS

Ainsi, pour les cendres donnant un riz de grande taille, le rendement tombe lorsque le sol n'est plus recouvert d'eau. Par contre, le rendement se maintient même si la nappe est épaisse.

Pour l'horizon de racines grossières, la nappe profonde aussi bien que la nappe trop épaisse provoquent une chute de rendement.

Les expériences que nous venons de citer indiquent combien l'alimentation en eau seule possède une large influence sur les rendements. Elles soulignent aussi que cette influence est plus ou moins intense en fonction de la nature du sol.



## II) ALIMENTATION MINERALE

L'aptitude des divers sols à alimenter le riz est testée avec une bonne alimentation en eau. Elle est évaluée par les rendements en paille et en grains obtenus sur des terres non fumées.

Les essais culturaux sont réalisés, d'une part, dans des vases de végétation identiques à ceux que nous avons déjà décrits et, d'autre part, en cases lysimétriques.

### A) ESSAIS EN VASES DE VEGETATION

#### 1) ECHANTILLON DE TERRE PRIS EN CONSIDERATION

Les tests réalisés permettent de comparer les valeurs agricoles des différents horizons des trois « stades évolutifs » décrits et étudiés antérieurement.

L'intérêt porté aux horizons autres que ceux de surface est dû à ce que les travaux de planage, nécessaires à l'installation de rizières cultivées et récoltées mécaniquement, décapent les profils et permettent aux racines de riz d'exploiter des horizons profonds.

Seront pris en considération :

au stade I :

l'horizon de racines grossières,  
l'horizon de débris de racines,  
l'horizon de matière organique fine ;

au stade II :

l'horizon organique de surface ;

au stade III :

l'horizon organique,  
l'horizon non organique (gley limono-argileux).

Le gley limono-argileux étant pratiquement analogue à lui-même au-dessous des profils correspondant aux trois stades évolutifs, il est inutile de le tester trois fois.

Puisqu'au-dessous de l'horizon organique de surface du stade II se retrouvent un horizon de débris de racines et un horizon de matière organique fine semblables à ceux rencontrés au stade I, il est superflu de les tester deux fois.

Par contre :

**les cendres** dérivées de la combustion des tourbes, au cours d'incendies se propageant sur le marais,

**le gley à texture sableuse**, que l'on rencontre dans quelques zones ayant longtemps conservé des courants assez violents et qui se trouve généralement en dessous du gley limono-argileux,

**les "alluvions fluviales récentes"**, qui se déposent en surface du stade III et sont voisines des sols les moins hydromorphes de la chaîne étudiée dans le premier chapitre, méritent d'être testés parallèlement aux autres horizons.

L'expérience montrant que la fertilité des alluvions fluviales, toujours peu pourvues en éléments organiques, augmente lorsque ces éléments croissent légèrement, nous testerons deux alluvions fluviales : l'une qui possède 4 % de matière organique totale, ce qui correspond à de fortes teneurs pour ce type d'horizon, l'autre qui en a moins de 2 %.

Ainsi, dix échantillons différents seront soumis à des tests culturaux en vases dans le but d'établir une hiérarchie dans leurs aptitudes à la production et d'essayer de préciser le rôle :

de l'évolution à longue échéance,  
de l'évolution à courte échéance (feu),  
de l'alluvionnement se produisant sur les stades évolués,  
des décapages mécaniques,

sur les rendements en riz.

## 2) METHODES DE TRAVAIL

Le remplissage des vases se réalise comme indiqué dans le paragraphe précédent.

La nappe d'eau est à 3 cm au-dessus de la surface de la terre.

L'eau évaporée est remplacée par une eau arrivant à la base des vases. Une vidange, dans le but d'oxygéner le milieu, est réalisée toutes les trois semaines.

Chaque vase est repiqué avec huit plants de « Makalioka » ayant deux mois de pépinière.

L'abri où sont placés les vases est celui déjà décrit.

Les terres utilisées sont prélevées la veille de la mise en place de l'essai qui débute, pour toutes les terres, le même jour.

La période d'essai correspond à celle pendant laquelle le riz est cultivé en plein champ. Les températures et les insolationes sont donc satisfaisantes.

## 3) RESULTATS OBTENUS

Après une année d'expérimentation, qui a permis de définir la technique de culture, un essai sur les dix échantillons précédemment énumérés est réalisé en effectuant cinq répétitions par échantillon, afin de donner plus de certitude aux résultats et de pouvoir raisonner à partir de moyennes arithmétiques.

Les rendements obtenus au cours de cet essai ayant été faibles, il a été reconduit une autre année, sur huit échantillons. Dans ce nouvel essai, les rendements ont en moyenne triplé.

Cette amélioration est due :

- à l'utilisation de plants provenant d'une meilleure pépinière,
- à un repiquage plus lâche (6 plants par vase, au lieu de 8) et plus précoce,
- à une année particulièrement favorable aux hauts rendements en rizières.

L'essai de contrôle a confirmé les résultats obtenus en première année et a permis de montrer que les techniques culturales avaient une large influence sur les rendements, même en vases de végétation.

Pour alléger le texte, on donnera les seuls résultats concernant la première année d'essais qui est la plus complète.

De plus, pour simplifier la présentation des résultats, deux graphiques sont utilisés :

Sur le premier (fig. 66) est tracée une droite horizontale sur laquelle, à des intervalles égaux, sont inscrits les noms des divers échantillons de terre à tester.

On trace ensuite trois droites verticales voisines sur lesquelles sont portées des échelles correspondant :

- à la taille moyenne des plants, au moment de la récolte,
- à la durée du cycle végétatif, exprimée en semaines et comptée à partir du repiquage jusqu'à la récolte du paddy,
- au rendement en paille non séchée, coupée au moment de la récolte des épis, exprimé en grammes par vase.

Puis, sur des lignes verticales élevées à partir du nom de chaque échantillon, sont portés pour chaque échantillon, compte tenu des échelles, des repères matérialisant les valeurs obtenues.

Pour faciliter la comparaison de ces valeurs, les repères ont une forme différente :

- ronds quand ils se rapportent à la taille,
- en  $\times$  lorsqu'ils concernent le cycle,
- carrés pour le rendement en paille.

Enfin, dans le même but, on relie à l'aide de courbes tous les repères de même nature obtenus pour les divers horizons des stades I, II et III décrits dans l'évolution à longue échéance.



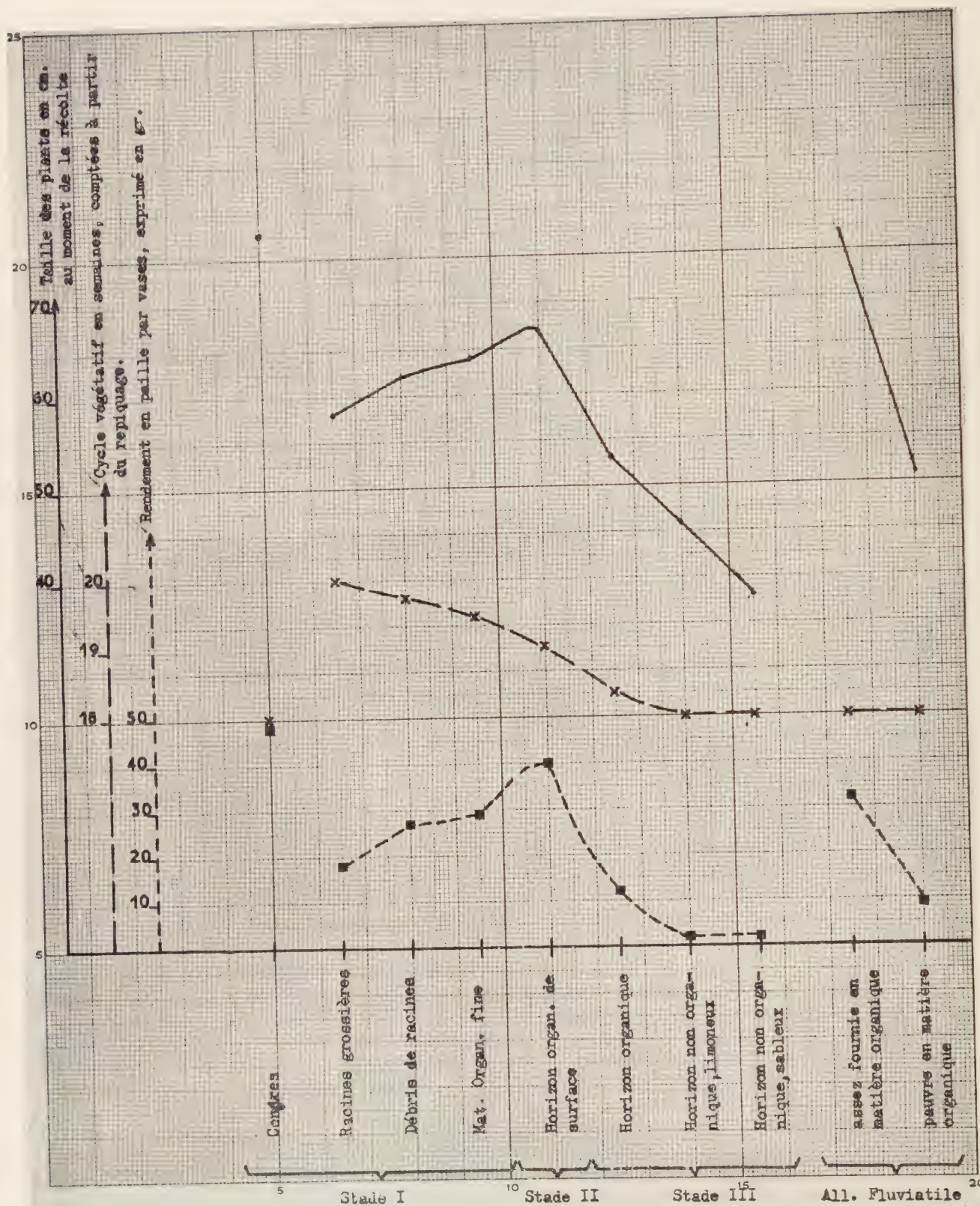


Figure 66



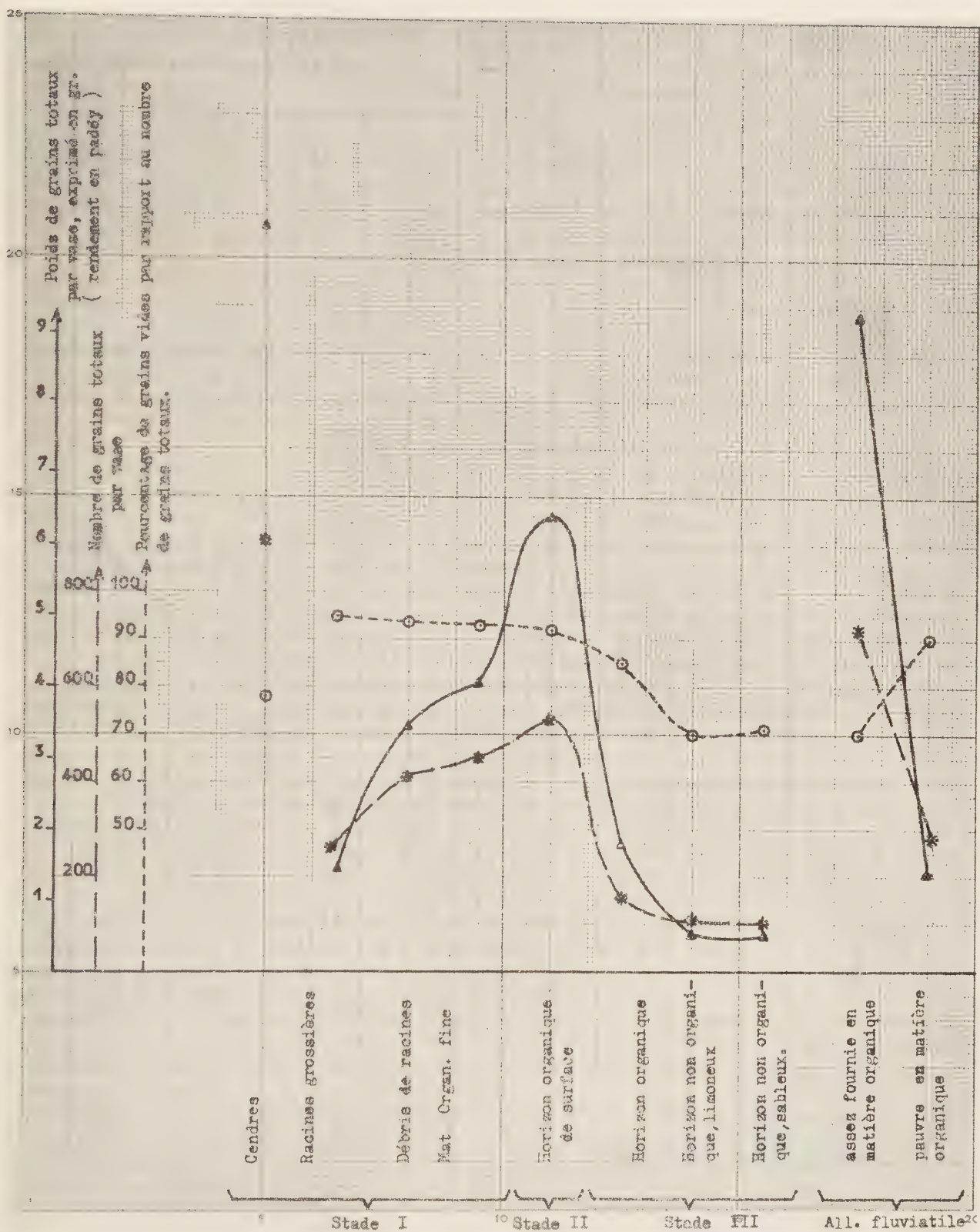


Figure 67

Sur le second graphique (fig. 67) sont tracés, suivant les mêmes principes que ceux adoptés pour le premier, les résultats relatifs aux rendements en grains qui sont :

le poids de paddy par vase, exprimé en grammes (grains pleins et grains vides),

le nombre de grains totaux par vase,

le pourcentage de grains vides par rapport aux grains totaux.

Pour compléter ces graphiques, signalons que l'aptitude au tallage est parallèle à l'aptitude des sols à donner des plants de grande taille.

Signalons, enfin, que la courbe relative aux poids de grains pleins a la même forme que celle relative aux poids de grains totaux qui a été tracée.

#### 4) INTERPRETATION DES RESULTATS

##### a) EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE

La grande majorité des racines de riz exploitent les vingt premiers centimètres du sol, ce qui revient à dire que, pour les trois stades évolutifs décrits, l'horizon de surface sera essentiellement responsable de la nutrition du végétal.

Les résultats obtenus pour les horizons de surface des trois stades se résument ainsi :

##### Stade I :

Végétation assez haute.

Cycle végétatif long.

Rendement en paille faible.

Le poids des grains totaux est faible. Ce mauvais rendement est la conséquence d'un nombre peu élevé de grains totaux par vase et d'un fort pourcentage de grains vides par rapport aux grains totaux.

Les grains vides ne possèdent qu'une enveloppe silicifiée et un embryon non développé.

##### Stade II :

Végétation plus haute.

Cycle végétatif moyen.

Rendement en paille élevé.

Le rendement en paddy est élevé, car bien qu'il y ait encore un fort pourcentage de grains vides, le nombre des grains totaux est très important.

##### Stade III :

Végétation basse.

Cycle végétatif court.

Rendement en paille faible.

Le rendement en paddy est faible, car les panicules, peu nombreuses, possèdent peu de grains. Le pourcentage de grains pleins est élevé.

Ainsi, le stade II, qui présente d'excellents caractères analytiques, est celui qui permet au riz de donner les meilleurs rendements en grains et en paille.

##### b) EVOLUTION A COURTE ECHEANCE

Il convient, pour connaître le rôle du feu sur la production agricole, de prendre en considération :

l'horizon de racines grossières du stade I, dont nous venons de commenter les aptitudes, et les cendres dérivées de cet horizon.

Sur les cendres pousse un riz qui a les caractères suivants :

végétation très haute,  
cycle végétatif court,  
rendement en paille élevé,

la production de paddy est très forte. Les grains totaux sont, en effet, nombreux et le pourcentage de grains vides peu élevé.

La combustion d'une tourbe sur le marais, qui crée une cendre partielle, encore assez fournie en éléments organiques et riche en bases échangeables, entraîne une forte amélioration de l'aptitude du sol à la riziculture.

Si la combustion englobe la végétation de Cypéracées, les cendres obtenues étant plus riches chimiquement que celles dérivées de tourbes, les rendements agricoles ne peuvent qu'être meilleurs.

#### c) RÔLE DE L'ALLUVIONNEMENT

L'examen des résultats relatifs aux échantillons d'« alluvions fluviales » montre que les rendements en paille et en grains sont plus forts lorsque l'alluvion n'est pas très pauvre en éléments organiques. Le mélange par labour du dépôt d'« alluvions fluviales » avec l'horizon de surface d'une tourbe au stade III ne peut qu'améliorer les rendements.

#### d) RÔLE DES DÉCAPAGES MÉCANIQUES

C'est à partir du stade II que les décapages mécaniques interviennent. En effet, avec une tourbe peu évoluée, les machines pénètrent mal sur le terrain et, de plus, les tassements étant rapides et variables d'un point à un autre, tout planage est à reprendre au bout d'une année.

Dès le stade II et jusqu'aux tourbes les plus évoluées, le décapage entraîne systématiquement une chute des rendements.

Ainsi, lorsqu'une tourbe au stade III nécessite un planage, il est préférable sur le plan économique de pousser hors du champ, à l'aide d'un « bull-dozer », l'horizon organique de surface, de planer le champ, puis de replacer en surface l'horizon organique.

Les horizons de gley sableux, particulièrement improductifs, ne devront jamais être mis à nu.

Ces tests des valeurs agricoles, des divers horizons rencontrés dans une tourbe évoluant par drainage, montrent que les aptitudes sont si diverses qu'elles permettent de passer de l'excellent au très mauvais rendement. Ces larges variations incitent à tirer des enseignements pratiques. C'est ce qui sera fait en conclusion de ce chapitre.

### B) ESSAIS EN CASES LYSIMÉTRIQUES

#### 1) BUTS POURSUIVIS

Ils sont au nombre de trois :

Le but essentiel est de mettre en évidence l'influence de la nature du sol sur la production agricole. Il s'agit, en utilisant quelques horizons, choisis parmi ceux qui ont été soumis aux tests d'aptitude culturale en vases de végétation, d'évaluer l'importance des rendements par hectare des terres étudiées jusqu'ici. Cette évaluation doit être réalisée dans des conditions identiques à celles rencontrées en rizières mais permettant, comme dans les expériences en vases de végétation, de régler à un niveau favorable tous les facteurs ayant une influence sur la production afin de pouvoir ainsi mettre en lumière exclusivement le rôle de la nature du sol.

L'évaluation du rendement en paddy par hectare est indispensable pour apprécier le revenu du cultivateur et permettre de définir la rentabilité, ou la non rentabilité, de la mise en valeur du marais.

Le second but est de préciser les conséquences sur les rendements des travaux de planage. En effet, les organismes responsables des aménagements de rizières ont tendance à sous-estimer, voire même à ignorer, le rôle des décapages sur la production ; ils risquent ainsi de ne fixer aucune limite à l'ampleur de l'amputation de certains profils et au recouvrement de leurs voisins par les produits de déblais.

Enfin, cet essai est utilisé pour mettre en évidence le rôle du remaniement d'un profil sur les rendements, remaniement qui se réalise au moment des planages ou par des labours profonds.



## 2) ECHANTILLONS DE TERRE PRIS EN CONSIDERATION

Compte tenu du prix de revient d'une expérience en cases lysimétriques, seuls trois horizons, parmi les dix étudiés en vases de végétation, sont retenus.

Ces horizons sont :

au stade II :

horizon organique de surface (c'est celui qui, exclusion faite des « cendres » et des « alluvions fluviatiles », a donné les meilleurs rendements) ; dans un but de commodité, il sera, dans la suite de l'exposé, appelé « S II » ;

au stade III :

horizon organique ; il sera appelé « S III » ;

horizon non organique constitué d'un gley limono-argileux ; c'est celui qui a donné les rendements les plus bas ; il sera appelé « G ».

## 3) DISPOSITION DE CES ECHANTILLONS DANS LES CASES

Les cases lysimétriques sont placées côte à côte dans une rizière de la région du Lac Alaotra (domaine d'Ambohibary appartenant à la Compagnie Générale) qui est installée sur un profil au stade III.

Ce choix présente l'avantage de n'exiger que le transport d'un horizon, puisque les deux autres se trouvent sur place.

L'horizon de surface d'un profil au stade II a été prélevé dans le même domaine agricole. Les cases sont constituées par des fosses carrées de 2 m de côté, profondes de 1 m. emplies avec la terre provenant de l'un ou de deux des horizons retenus.

Une exception est faite pour les cases appelées « témoins » qui sont constituées du sol de la rizière où se réalise l'essai, sans qu'aucun remaniement n'intervienne.

Ces cases-témoins sont destinées :

à comparer les rendements obtenus dans les conditions de culture de l'essai avec ceux obtenus sur la rizière dans laquelle l'essai est placé. Cette rizière est cultivée suivant les bonnes techniques adoptées en culture mécanisée ;

à mettre en évidence le rôle des remaniements sur les rendements au sein de l'essai.

A partir des trois horizons retenus, cinq profils, schématisés par le croquis de la figure 68, sont constitués :

un horizon de 25 cm d'épaisseur, constitué de l'horizon organique de surface d'un sol

au stade II, reposant sur un gley remanié, du stade III (Profil  $\frac{\text{S II}}{\text{G}}$ ) ;

un horizon de 100 cm d'épaisseur, constitué de l'horizon organique de surface d'un sol au stade III, remanié (Profil S III) ;

un horizon de 25 cm d'épaisseur, constitué de l'horizon organique d'un sol au stade III,

reposant sur un gley du stade III (Profil  $\frac{\text{S III}}{\text{G}}$ ) ;

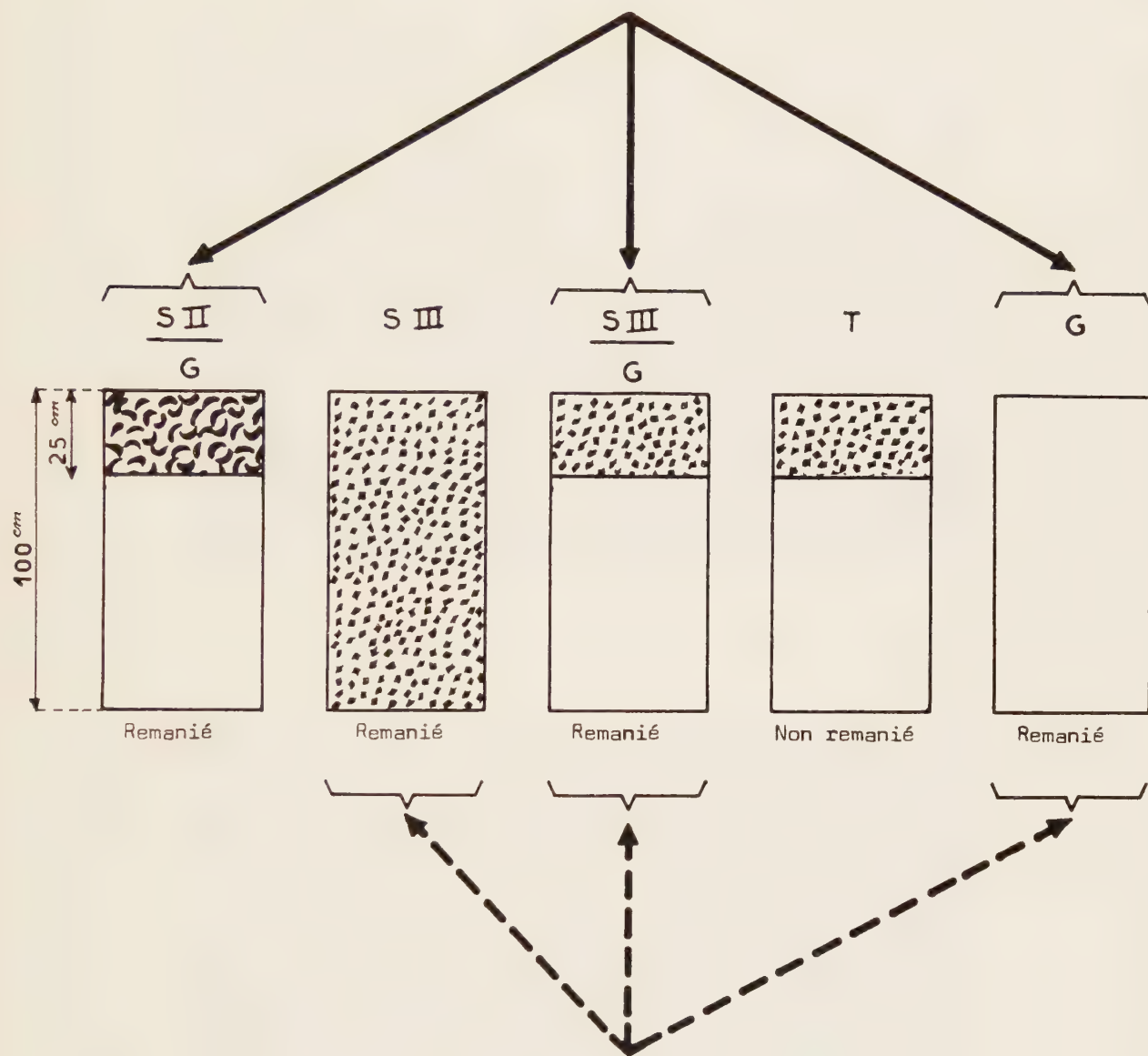
un profil-témoin constitué du sol de la rizière non remanié (Profil T) ;

un horizon de 100 cm d'un gley du stade III, remanié (Profil G).

Le croquis montre que, pour le premier but poursuivi, il convient de prendre en considération :

$\frac{\text{S II}}{\text{G}}$ ,  $\frac{\text{S III}}{\text{G}}$  et G.

# ROLE de l'EVOLUTION



INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE  
L'HORIZON ORGANIQUE

Figure 68

En effet, lorsque l'évolution d'une tourbe est poussée à l'extrême, ses taux de matières organiques s'abaissent de telle manière que la surface du profil ne diffère que très peu de l'horizon sous-jacent constitué d'un ancien gley. Ainsi, ces trois profils traduisent la disparition progressive et presque totale des matières organiques.

Ces trois profils, à partir de 25 cm de profondeur, possèdent le même horizon (G). Ceci permet d'assurer que les variations de rendement sont dues exclusivement à la terre placée entre 0 et 25 cm, qui renferme d'ailleurs la quasi-totalité des racines de riz.

Le croquis indique qu'il convient de retenir : S III,  $\frac{\text{S III}}{\text{G}}$  et G, pour mettre en évidence le rôle des remblayages et des décapages sur les rendements.

Enfin, en comparant :  $\frac{\text{S III}}{\text{G}}$  et T, le rôle des remaniements apparaît.

#### 4) CONDITIONS DE REALISATION DE L'ESSAI

Les figures 69 et 70 ci-jointes précisent l'allure des cases et la morphologie de leur environnement.

Le schéma de la figure 71 donne le dispositif expérimental adopté qui est du modèle carré latin.

Chaque case possède son système d'irrigation et de drainage indépendant, permettant de régler strictement la nappe à 10 cm au-dessus du sol et d'éviter aussi que les eaux ayant lessivé une parcelle ne se retrouvent sur une autre.

La plantation a lieu pour toutes les cases à la mi-décembre, ce qui correspond aux normes adoptées en grande culture. Elle a lieu avec des plants de « Makalioka 34 » âgés de 2 mois qui sont placés à 15 cm les uns des autres sur la ligne. Les lignes étant distantes de 15 cm, 1 m<sup>2</sup> de terrain reçoit ainsi 49 plants.

Dans chaque case, on plante un carré de 2 m de côté, mais les observations et les mesures ne sont faites que sur le mètre carré occupant le centre de la case, afin d'éliminer les effets de bordure.

L'essai est contrôlé deux fois par jour.

Pour confirmer les résultats acquis au cours d'une première année, l'essai est reconduit dans les mêmes conditions, une année de plus.

#### 5) RESULTATS OBTENUS ET INTERPRETATION

##### a) TAILLE DES PLANTS AU MOMENT DE LA RECOLTE

Les chiffres moyens obtenus en première année sur les cinq répétitions permettent de dire :

que l'évolution provoque une diminution de la taille des plants qui passe de 130 cm

sur  $\frac{\text{S II}}{\text{G}}$  à 100 cm sur G ;

que le décapage agit dans le même sens ;

que le remaniement d'un profil n'a pas d'effet visible sur la hauteur du riz.

Il convient de noter que le nombre moyen de talles par plant est, en première année d'essai, de :

6,5 pour  $\frac{\text{S II}}{\text{G}}$

5 pour  $\frac{\text{S III}}{\text{G}}$

3,4 pour G

ce qui permet de dire que l'évolution diminue le nombre de talles et confirme les observations effectuées en vases. Le décapage diminue aussi le tallage, alors que le remaniement d'un profil est sans action.



Fig. 69 et 70

ESSAI EN CASES LYSIMETRIQUES

(Lac Alaotra)



Fig. 69. — Vue générale.



Fig. 70. — La rangée supérieure de l'essai montre, de gauche à droite, les profils suivants :  
G ; S II/G ; S III/G ; T ; S III.

Echelle:  $\frac{1}{100e}$

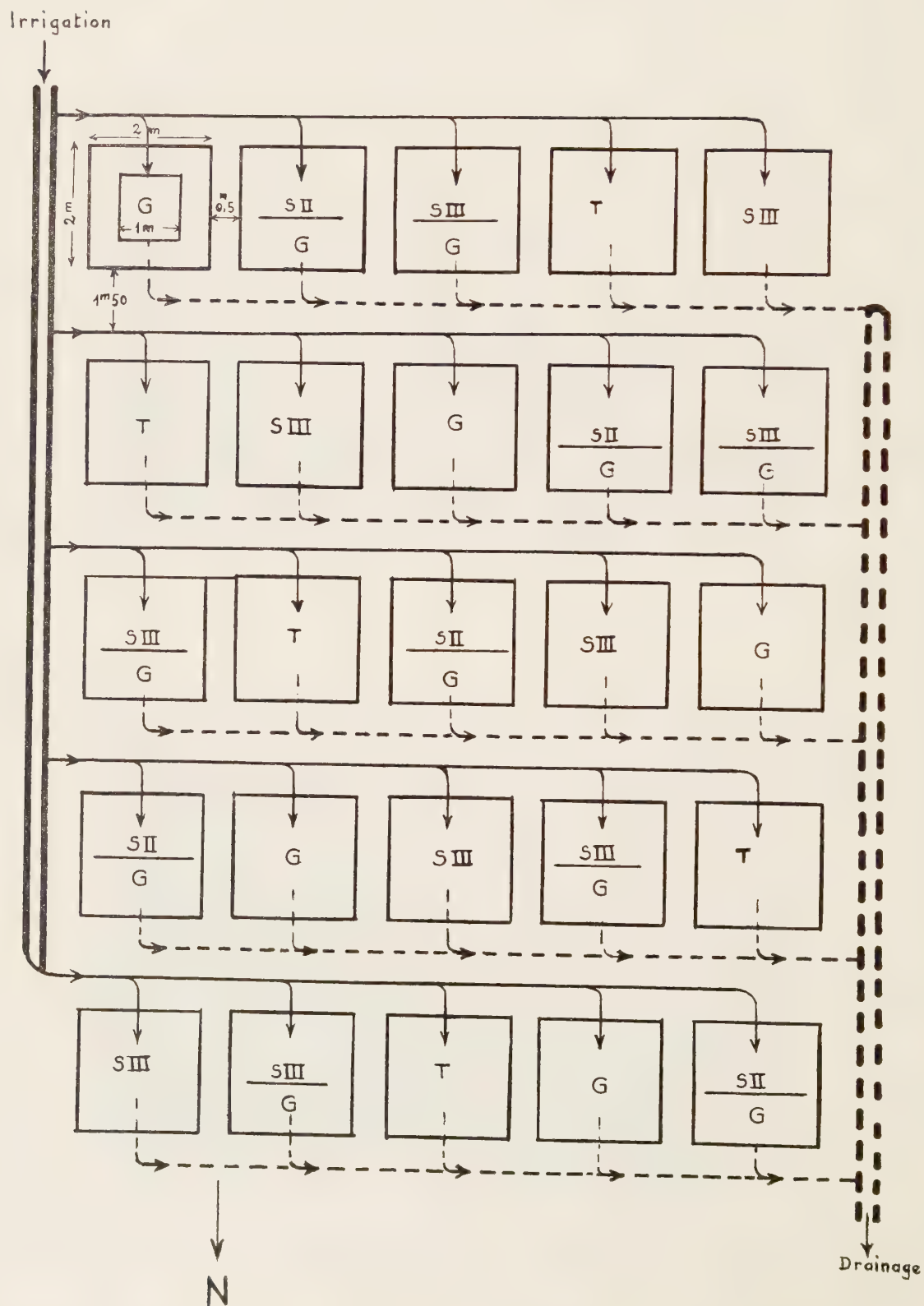


Fig. 71

## b) DUREE DU CYCLE VEGETATIF

L'évolution provoque un raccourcissement du cycle végétatif : il faut, en effet, récolter le riz

poissant sur  $\frac{S II}{G}$  dix jours après celui poissant sur G.

Le décapage agit dans le même sens et le remaniement du profil reste encore sans action.

## c) RENDEMENT EN PADDY ET EN PAILLE

Pour toutes les cases, le nombre de talles fertiles varie de 95 à 100 %. Ce facteur n'intervient donc pas sur les rendements en grains.

Le schéma de la figure 72 donne, en respectant la disposition de l'essai, pour chaque case :

- en première ligne le rendement en paddy, exprimé en grammes par mètre carré ;
- en seconde ligne le rendement en paille non séchée, coupée après la récolte des grains, en grammes par mètre carré.

A titre d'exemple, la case située en haut de la feuille et à gauche est constituée d'un sol G qui a produit 229,5 g de paddy et 485 g de paille par mètre carré cultivé.

L'interprétation des résultats concernant les rendements en paille et en grains est réalisée à l'aide d'une méthode statistique faisant intervenir le test de DUNCAN. On observera que les différences mises en évidence seront toujours hautement significatives.

## α) EN PREMIERE ANNEE DE CULTURE

En première année, les résultats suivants ont été obtenus :

## α') POUR LE PADDY

| Classement des profils | Moyenne parcellaire<br>(en g pour 1 m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|------------------------------------------------------|
| $\frac{S II}{G}$       | 955                                                  |
| S III                  | 946                                                  |
| T                      | 778                                                  |
| $\frac{S III}{G}$      | 718                                                  |
| G                      | 331                                                  |

Les accolades tracées relient entre eux les traitements statistiquement équivalents.

Le coefficient de variation étant de 13 %, l'essai peut être considéré comme homogène.

L'écart-type de la moyenne est 45,0 g par parcelle de 1 m<sup>2</sup>.

## β') POUR LA PAILLE

| Classement des profils | Moyenne parcellaire<br>(en g pour 1 m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|------------------------------------------------------|
| $\frac{S II}{G}$       | 2.102                                                |
| S III                  | 1.735                                                |
| T                      | 1.600                                                |
| $\frac{S III}{G}$      | 1.439                                                |
| G                      | 675                                                  |

Le coefficient de variation est de 17 %, donc élevé, et traduit une certaine hétérogénéité dans les résultats. Cette constatation est courante dans les essais lorsqu'il s'agit de poids de paille.

L'écart-type de la moyenne est de 116,5 g par parcelle de 1 m<sup>2</sup>.



Résultats obtenus en 1ère  
année

|                |                |              |              |              |
|----------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| 229,5<br>485   | 848<br>1.865   | 723<br>1.517 | 784<br>1.505 | 834<br>1.775 |
| 731<br>1.647   | 1.012<br>1.268 | 465,5<br>946 | 934<br>1.386 | 756<br>1.525 |
| 962<br>1.835   | 764<br>1.670   | 933<br>2.159 | 909<br>1.740 | 318,5<br>644 |
| 1.083<br>2.610 | 273<br>541     | 935<br>1.710 | 555<br>1.112 | 727<br>1.365 |
| 1.042<br>2.185 | 594<br>1.209   | 884<br>1.815 | 369,5<br>759 | 979<br>2.491 |

Résultats obtenus en 2ème  
année

|              |              |              |              |              |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 235<br>233   | 656<br>1.080 | 526<br>818   | 642<br>1.084 | 630<br>919   |
| 758<br>916   | 585<br>841   | 382<br>431   | 779<br>1.435 | 561<br>825   |
| 621<br>805   | 725<br>1.137 | 733<br>1.117 | 518<br>840   | 229<br>226   |
| 843<br>1.495 | 235<br>205   | 615<br>1.027 | 473<br>641   | 700<br>1.083 |
| 554<br>980   | 619<br>904   | 650<br>1.034 | 308<br>365   | 736<br>1.920 |

Fig. 72

β) EN DEUXIÈME ANNÉE DE CULTURE

En deuxième année, les résultats obtenus sont les suivants :

α') POUR LE PADDY

| Classement des profils | Moyenne parcellaire<br>(en g pour 1 m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|------------------------------------------------------|
| S II                   |                                                      |
| G                      | 749                                                  |
| T                      | 695                                                  |
| S III                  | 580                                                  |
| S III                  |                                                      |
| G                      | 560                                                  |
| G                      | 278                                                  |

Le coefficient de variation est de 11 %.

L'écart-type de la moyenne est de 28,0 g par parcelle de 1 m<sup>2</sup>.

β') POUR LA PAILLE

| Classement des profils | Moyenne parcellaire<br>(en g pour 1 m <sup>2</sup> ) |
|------------------------|------------------------------------------------------|
| S II                   |                                                      |
| G                      | 1.409                                                |
| T                      | 1.051                                                |
| S III                  | 921                                                  |
| S III                  |                                                      |
| G                      | 799                                                  |
| G                      | 292                                                  |

Le coefficient de variation est de 19 %.

L'écart-type de la moyenne de 78,5 g par parcelle de 1 m<sup>2</sup>.

La classification statistique qui vient d'être établie permet de dire :

1) l'évolution, entre le stade II et les stades ultimes, entraîne une chute significative des rendements en paddy et en paille que traduit bien le tableau suivant, relatif à la première année d'essai :

|                              | Rendement en paddy<br>(en t/ha) | Rendement en paille<br>(en t/ha) |
|------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| S II<br>G (Stade II) .....   | 10                              | 21                               |
| S III<br>G (Stade III) ..... | 7                               | 14                               |
| G (Stade ultime) .....       | 3                               | 7                                |

2) le décapage provoque une chute des rendements en paddy et en paille, qui est bien marquée lorsque l'horizon organique atteint des valeurs inférieures à 25 cm d'épaisseur ;

3) le remaniement ne provoque aucune différence significative sur les rendements, mais, partout, le sol non remanié fournit des résultats légèrement supérieurs à ceux donnés par les sols remaniés.

La rizière dans laquelle est placé l'essai a donné, en grande culture, 4 t de paddy par hectare, alors que nos témoins en cases lysimétriques ont donné 7 t la même année. Ceci permet d'évaluer l'ordre de grandeur des rendements que donneraient, en grande culture, les profils étudiés en cases.

d) PROPORTIONS DE GRAINS VIDES ET CONSEQUENCE DE LA PRESENCE DE CES GRAINS VIDES SUR LA VALEUR DU GRAIN A L'USINAGE ET A LA VENTE

Dans cet essai, la proportion des grains vides sera appréciée en mesurant la densité apparente du paddy.

1) La variation de la proportion des grains vides au cours de l'évolution par drainage est résumée par le tableau suivant, dont les chiffres correspondent à des moyennes arithmétiques, obtenues sur cinq répétitions, en première année de culture :

|         | Inverse de la densité du paddy |
|---------|--------------------------------|
| S II    |                                |
| G ..... | 2,1                            |
| S III   |                                |
| G ..... | 2                              |
| G ..... | 1,9                            |

Ces résultats confirment ceux acquis en vases de végétation, qui montrent que le pourcentage de grains vides par rapport aux grains totaux diminue à mesure que le sol évolue. Ainsi, le paddy produit sur sol évolué est de meilleure qualité que celui produit sur tourbes récemment mises en culture.

Malgré cela, les acheteurs qui travaillent pour le compte des usiniers offrent le même prix pour tous les paddy. Les grains vides étant très légers et l'achat se faisant au poids, les différences ne sont pas très importantes, ce qui rend acceptable leur manière de procéder.

Pourtant, il apparaît que, lorsque les grains vides sont nombreux dans un paddy, il existe aussi un nombre assez important de grains mal développés, qui pourraient intervenir sur le comportement du riz à l'usinage et, éventuellement, sur sa valeur marchande définie par les normes de conditionnement appliquées aux lots commercialisés. Les usiniers, passant pêle-mêle à la machine les paddys provenant de sols tourbeux drainés ayant atteint des stades évolutifs divers, ne peuvent établir de relation entre les rendements à l'usinage et la nature du sol d'où provient le paddy.

Pour cette raison, on a usiné séparément, à l'aide d'une rizerie miniature Universale Officina Meccanica Guidetti i Artioli (Vercelli), le paddy provenant de chacune des cases lysimétriques.

Les résultats obtenus sur les récoltes correspondant à deux années de culture peuvent ainsi se résumer, en prenant en considération un paddy passé au ventilateur, c'est-à-dire privé de ses grains vides :

a) A mesure qu'une tourbe évolue, les pourcentages de brisures (grains en morceaux à faible valeur marchande) et de farine, donnés par le paddy à l'usinage, diminuent. Cette baisse est particulièrement marquée au niveau des stades évolutifs très poussés.

A titre d'exemple, on obtient :

20 % de brisures avec un paddy provenant de  $\frac{\text{S II}}{\text{G}}$  ;

à peine moins de 20 % avec un paddy provenant de  $\frac{\text{S III}}{\text{G}}$  ;

seulement 6 % avec un paddy provenant de G.

Il est évident que ces chiffres sont fonction du mode de réglage de l'usine et des conditions de séchage du paddy, mais la hiérarchie reste toujours la même.

Pour la farine, les variations sont moins nettes et restent dans le même sens. On obtient de 10 à 5 % de farine en fonction de la nature du paddy.



b) Les riz, dérivés de paddys provenant de tourbes plus ou moins évoluées, sont toujours classés, par les spécialistes du conditionnement, dans la catégorie « riz de luxe », car ces riz :

- ne comportent aucun grain jaune ;
- ont au moins 96 % de grains supérieurs ou égaux à 6 mm (les chiffres obtenus pour les divers cas sont inclus dans les limites suivantes : 96,5 %,  $\pm 0,5$  % en fonction de la nature de la case lysimétrique les produisant) ;
- possèdent 1 % de grains crayeux ( $\pm 0,5$  %, suivant les cas) ;
- enfin, ont 1,4 % de grains immatures ( $\pm 0,5$  %, suivant les cas).

La valeur marchande du riz une fois usiné est, en conséquence, toujours la même et c'est avant tout la variété qui la détermine.

En résumé, sur tourbe moyennement évoluée, le paddy a plus de grains vides, un moins bon rendement à l'usinage, mais donne la même qualité de riz que le paddy produit sur tourbe très évoluée. Le paddy, riche en grains vides, a donc incontestablement une valeur marchande un peu moins élevée que les autres.

2) Le **décapage des profils** agit dans le même sens qu'une évolution poussée en ce qui concerne : la proportion de grains vides, les qualités à l'usinage du paddy, la valeur marchande du riz obtenu.

3) Par contre, le **remaniement** d'un même profil est sans action sur les caractères du paddy.

#### e) RESUME DES RESULTATS OBTENUS EN CASES LYSIMETRIQUES

##### α) RESULTATS RELATIFS A L'EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE

Ils confirment qu'entre le stade II et le stade III, les rendements en paddy et en paille diminuent grandement.

Ils indiquent, pour les rendements, les valeurs suivantes :

- 10 t de paddy par hectare au stade II, ce qui laisse prévoir, en culture mécanisée, une production de l'ordre de 6 t,
- 7 t au stade III, soit 4 t en culture mécanisée.

Ils font apparaître que l'évolution d'une tourbe entraîne une meilleure qualité à l'usinage du paddy produit.

##### β) RESULTATS RELATIFS AUX PLANAGES

Les décapages sont dépressifs sur les rendements en paddy et en paille et les remblayages, entraînant un épaissement exagéré de l'horizon organique, sont peu favorables.

##### γ) RESULTATS RELATIFS AUX REMANIEMENTS DES TERRES

Les remaniements n'ont aucun effet significatif.

### III) CONCLUSIONS RELATIVES A L'ENSEMBLE DE L'EXPERIMENTATION REALISEE

Après le résumé des conclusions essentielles, on donne quelques conseils pratiques concernant l'utilisation agronomique des sols de marais drainés.

#### ENUMERATION DES CONCLUSIONS

##### 1) ALIMENTATION EN EAU DU VEGETAL

L'expérimentation qui a été conduite montre que l'irrigation joue un rôle capital sur les rendements en paddy et que, pour comparer l'aptitude de deux sols à assurer l'alimentation minérale d'un végétal, il est nécessaire que la plante soit, à tous les instants, placée dans les meilleures conditions d'alimentation en eau.

En effet, tout écart fait à la bonne irrigation a des conséquences plus ou moins graves sur les rendements, en fonction du sol pris en considération.

C'est ainsi que le riz poussant sur les cendres provenant de la combustion de tourbes est très sensible aux mises à sec assez prolongées, qui se traduisent par une baisse de rendement, alors que lorsqu'il se développe sur des horizons riches en matières organiques, pas très grossières, il résiste mieux à la sécheresse.

De même, une nappe phréatique un peu trop élevée en rizière est préjudiciable aux rendements sur sols donnant des plants de petite taille, alors qu'elle ne l'est pas si la végétation est haute.

## 2) ALIMENTATION MINERALE

De bonnes conditions d'irrigation étant assurées, la comparaison de l'aptitude de différents horizons, non fumés, à alimenter le riz conduit aux résultats suivants :

- a) En considérant une évolution à longue échéance, les rendements en paddy sont :
  - faibles sur un sol au stade I (de l'ordre de 1 t par hectare en grande culture) ;
  - forts au stade II (de l'ordre de 6 t en culture mécanisée) ;
  - moyens au stade III (4 t en culture mécanisée) ;
  - faibles lorsque le stade III est dépassé (moins de 1 t).

C'est donc le sol au stade II, qui présente de bons caractères analytiques, qui est de loin le plus productif.

Les variations de rendements enregistrées montrent que la mise en culture de tourbes par drainage provoque avec le temps l'apparition d'une bonne phase de production.

Compte tenu des techniques culturales utilisées, entraînant un engorgement de la surface du sol de cinq mois par an, cette phase ne dure pas, car la diminution du stock organique se poursuit.

- b) Le brûlage d'une tourbe créant une cendre partielle, très riche chimiquement, provoque une augmentation considérable des rendements en paddy, comparés à ceux obtenus avant incendie.

- c) Le dépôt de limon argileux, contenu dans les eaux d'irrigation, sur les tourbes évoluées, améliore la production agricole.

- d) Le planage des rizières est préjudiciable au rendement de l'ensemble des surfaces planées.

### CONSEILS PRATIQUES QUE CES CONCLUSIONS ENTRAÎNENT

Les divers stades évolutifs décrits vont être passés en revue.

#### STADE I

Lorsqu'un sol tourbeux est au stade I et qu'asséché il possède des horizons organiques ayant plusieurs mètres d'épaisseur (2 à 5 m sont courants et 10 m ne sont pas rares), l'action du feu est souhaitable.

En effet, l'incendie détruit une végétation qui rend difficile l'accessibilité du terrain aux hommes et aux machines. De plus, il forme une cendre qui possède une grande aptitude culturale, assurant dès le début de la mise en valeur des terres de bons rendements. La cendre peut se planer grossièrement et à peu de frais en traînant sur le champ un cadre de bois constitué de poutres assemblées. Cette technique évite, dans la rizière, la présence de fortes dénivellations rendant difficile l'alimentation en eau du végétal.

Le brûlage doit être réglé pour produire environ 5 à 10 cm de cendres, qui sont suffisants pour contribuer à la bonne nutrition minérale du riz, dont le cycle végétatif est de cinq mois.

Pour empêcher l'incendie de gagner la profondeur de la tourbe, la nappe phréatique devra gorger les horizons à ne pas brûler. Son contrôle est donc indispensable.

Pour éviter les érosions éoliennes sur les cendres, le brûlage se réalisera en fin de saison sèche.

Pour ralentir l'entraînement oblique par les eaux, l'hydratation des cendres se fera progressivement et des diguettes assez rapprochées les unes des autres seront aménagées à partir de la tourbe non brûlée.

Cette technique du brûlage, reconduite d'une année à l'autre, permet d'utiliser le trop volumineux stock organique en obtenant des rendements en riz satisfaisants.

Une fois consumés les horizons constitués de racines grossières, les incendies devront être arrêtés. A cette phase, d'ailleurs, la tourbe brûle moins bien, ce qui diminue l'efficacité des combustions.

Il semble que cinq années environ soient suffisantes pour que, sans feu ou avec des incendies ne consumant que la végétation, un profil du type « stade II » se constitue.

Si le brûlage des tourbes se réalise sans que l'agriculteur soit maître de la nappe pour régler l'épaisseur du sol à brûler, il se produit des incendies grandioses dilapidant les réserves organiques. Les cendres ainsi produites, bien que très épaisses, disparaissent par érosion et ne subviennent pas plusieurs années de suite à l'alimentation du riz.

Aucun agriculteur ne peut tirer profit d'un sol au stade I qui est improductif. Il ne peut non plus, à moins d'être largement subventionné, attendre que, après drainage, le sol évolue par voie microbienne et devienne ainsi, à la longue, fertile. Les agriculteurs sont donc favorables aux feux.

Lorsqu'une tourbe n'est pas trop éloignée des sols ferrallitiques de collines, la terre de ces collines mélangée à la tourbe augmente sensiblement les rendements agricoles. L'inconvénient majeur de cette technique est son prix élevé.

En résumé, le feu apparaît comme une solution à adopter sur des tourbes récemment drainées, à la condition de pouvoir régler ses actions. Lorsque les horizons fibreux sont détruits, il faut le proscrire définitivement.

## STADE II

Quand une tourbe est au stade II, il est souhaitable d'arrêter son évolution, puisque sa valeur agricole est bonne et que celle-ci va en décroissant à mesure que l'évolution se poursuit.

Si le système de drainage fonctionne bien et que le sol est cultivé en riz, sa période d'ennoyage est réduite à cinq mois par an. Le reste du temps, en adoptant le mode traditionnel d'utilisation de ces terres, le sol est nu et sec.

Ce régime d'hydromorphie entraîne une chute des taux de matières organiques, consécutive aux actions microbiennes qui sont efficaces. Le profil tend donc vers le « stade III ».

Dans les conditions pédoclimatiques liées au régime de la riziculture, cette évolution ne peut être arrêtée au stade II, mais elle est susceptible de ralentissement. Le freinage de l'évolution s'obtient en adoptant les principes suivants :

- proscrire tout incendie, même sur les pailles de riz ; celles-ci seront hachées au giro-broyeur et enfouies ;
- remettre en eau la rizière après la récolte, pendant la majorité de la saison sèche ; les oxydations des matières organiques par voie microbienne sont aussi diminuées ;
- lorsque la réserve en eau, destinée à l'irrigation du périmètre, ne permet pas de noyer les terres en saison sèche, il convient d'y cultiver une plante de couverture qui sera de préférence enfouie en fin de cycle.

L'agriculteur peut, de cette manière, espérer une stabilisation relative de l'évolution, à un niveau compris entre le stade II et le stade III, généralement plus proche du stade III.

## STADE III

Ce stade est atteint en dix ou vingt ans après la mise en fonctionnement du système de drainage si les précautions préconisées ci-dessus à prendre sur un sol au stade II n'ont pas été adoptées. Les rendements sont à ce stade moins bons mais encore satisfaisants et un équilibre entre le régime dépendant de la riziculture et la nature du sol s'établit, à la condition d'apporter à la rizière du fumier de ferme (10 t/ha/an), de cultiver en contre-saison un engrais vert et d'apporter une fumure minérale (N, K, P et Ca) qui est d'autant plus indispensable que la minéralisation des matières organiques est faible. Cette fumure sera plus forte en rizières peu alluvionnées.

## EVOLUTION ULTIME

Lorsque la riziculture se réalise sans aucune précaution pour maintenir élevé le potentiel de production du sol, le stade III dure quelques décennies, puis les rendements deviennent catastrophiques.

A ce stade, il faut : soit mettre en eau le périmètre, pour permettre à la tourbe de se reconstituer, soit apporter des fumures de redressement qui, généralement, ne peuvent être rentables avec le riz, dont la valeur marchande est faible.



En résumé, il apparaît que, pour tirer le meilleur parti d'une tourbe au cours des temps, il convient de :

- 1) la brûler dans des limites bien précises (stade I) puis d'abandonner les feux.
- 2) ralentir l'oxydation des matières organiques par des techniques culturales et des ennoyages (stade II) ;
- 3) maintenir le potentiel de production des terres par l'apport de fumier et d'engrais (stade III) ;
- 4) remettre en eau les terres trop dégradées, pour que le marais se reconstitue.

Pour compléter l'énumération de ces conseils pratiques, rappelons que plus un sol tourbeux est évolué, plus les décapages sont préjudiciables à sa valeur agricole. Il convient donc, lorsque des nivellements sont indispensables, de les réaliser de la manière suivante :

- enlèvement au « bulldozer » de l'horizon organique, qui est poussé sur un champ voisin ;
- planage ;
- remise en surface de l'horizon organique.

## CONCLUSIONS GENERALES

Les conclusions de cet étude s'attacheront à définir, de façon concise, les principales observations faites et les résultats essentiels pouvant présenter un intérêt soit sur le plan scientifique, soit sur le plan pratique.

### OBSERVATIONS ET CONCLUSIONS ESSENTIELLES

#### I

Les sols de bas-fonds, tous plus ou moins soumis, sur les Hauts-Plateaux malgaches, à l'hydromorphie, sont souvent les seules terres cultivées et leur étude pédologique présente donc un intérêt primordial.

Ces sols sont constitués de matériaux alluvionnés, provenant des sols ferrallitiques qui les entourent et, dans le cas d'engorgement par l'eau très prononcé, par une accumulation de matières organiques mal décomposées, dérivées de Cypéracées.

#### II

Quelques profils-types de la chaîne de sols rencontrés dans la majorité des dépressions, subissant d'une année à l'autre et à la même saison un engorgement d'intensité constante, sont d'abord définis.

- 1) Morphologiquement, la chaîne comporte cinq profils :

- sol marmorisé,
- sol à pseudogley,
- sol à gley,
- sol semi-tourbeux,
- sol tourbeux.

- 2) Les analyses réalisées sur les différents horizons de ces profils montrent que :

- les textures s'affinent et s'homogénéisent à mesure que l'hydromorphie s'accroît ;

lorsque l'engorgement par l'eau progresse, les densités apparentes diminuent en surface, dans de telles proportions qu'il devient indispensable, pour tenter d'évaluer l'aptitude culturale d'une terre en partant de résultats analytiques, de les exprimer par rapport à une unité de volume de sol humide ;

pour un degré d'hydromorphie non excessif, compris entre celui donnant naissance au « sol à gley » et celui donnant naissance au « sol semi-tourbeux », la surface du sol présente les meilleures teneurs en matières organiques totales, en azote total, en humus ; les taux d'humification les plus forts et la capacité d'échange totale la plus élevée (expression par unité de volume) ;

en plus de ces caractères exceptionnels, ces terres bénéficient d'un régime d'ennoyage naturel satisfaisant la riziculture. Elles sont donc recherchées par les agriculteurs qui en obtiennent de bons rendements ;

l'acidité augmente légèrement avec l'hydromorphie, mais reste proche de pH 5 ;

la nature des argiles est la même dans une dépression, quelles que soient les intensités de l'hydromorphie. Elle est identique à celles des collines, fournissant par érosion le matériau alluvionné en bas de pente ;

les bases échangeables, les teneurs en fer et le rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , toujours inférieur à 2, diminuent en surface du sol à mesure que l'hydromorphie croît.

Ainsi, dans les dépressions, les empreintes mises par l'hydromorphie sur les sols sont importantes non seulement en ce qui concerne leur morphologie, mais aussi l'ensemble de leurs caractères physico-chimiques.

Quatre profils de la chaîne s'intègrent dans la classe des sols hydromorphes de la classification française de la manière suivante :

Sous-classe des hydromorphes organiques :

sols tourbeux.

Sous-classe des semi-tourbeux \* :

sols semi-tourbeux \*\*.

Sous-classe des hydromorphes minéraux :

sols à gley,

sols à pseudogley.

Le cinquième se place dans la classe des sols à profils peu différenciés \*\*\*.

### III

L'évolution du sol tourbeux par drainage est tout particulièrement prise en considération, puisque le marais inculte représente la zone d'extension par excellence de la riziculture.

La transformation de la tourbe, réglée par les techniques utilisées pour sa mise en valeur où interviennent les feux, donne à des échéances assez lointaines des stades évolutifs caractéristiques dans lesquels les actions fugaces des incendies passent inaperçues.

1) En définissant le sens de l'évolution à longue échéance à l'aide de trois stades évolutifs :

Stade I : tourbe non drainée,

Stade II : tourbe moyennement évoluée,

Stade III : tourbe évoluée.

on constate que le drainage d'une tourbe entraîne :

un tassement considérable du profil initial et la disparition des horizons fibreux,  
une forte augmentation de la densité apparente des horizons de surface,  
un enrichissement relatif en argile et limon,  
une amélioration marquée de l'activité microbienne,  
une diminution du C/N qui a, dans une tourbe non drainée, des valeurs trop élevées,  
un abaissement des perméabilités qui sont excessives dans les horizons fibreux,  
une augmentation de la plasticité ;

Ce drainage ne provoque que peu de variations dans l'acidité du milieu, les taux de fer et la valeur du rapport  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Il ne modifie nullement la nature des argiles.

\* Cette sous-classe peut être appelée : « Sous-classe des sols hydromorphes moyennement organiques ».

\*\* Les sols semi-tourbeux peuvent être appelés : « Sols humiques à gley ».

\*\*\* On a aussi proposé : « Sols peu évolués ».

Enfin, il se traduit par une élévation puis une chute dans les horizons de surface :

de l'azote total,  
des acides humiques et des taux d'humification,  
de la capacité d'échange totale du complexe absorbant et de la somme des bases échangeables,  
des réserves d'eau.

Dans cette ascension puis cette baisse des valeurs, il apparaît que les chiffres les plus forts correspondent à une tourbe moyennement évoluée, qui possède une proportion convenable de matières minérales par rapport aux matières organiques, un C/N pas excessivement élevé, des valeurs moyennes concernant l'activité microbienne, la perméabilité et la plasticité.

C'est donc encore, comme dans l'étude de la chaîne des sols, pour une hydromorphie non excessive que les sols présentent les meilleurs caractères.

2) L'évolution à brève échéance, provoquée par un incendie récent et intense, entraîne, comme pour une évolution à longue échéance dont il est l'un des facteurs :

un fort tassement de la surface du sol,  
une augmentation de la densité apparente,  
un enrichissement relatif en argile et limon,  
une diminution du C/N et de la perméabilité.

La combustion récente a pour effet spécial :

de produire des cendres partielles : encore assez fournies en éléments organiques exprimés par unité de volume, riches en bases échangeables et totales et en  $P_2O_5$  total ;  
de diminuer l'acidité et le pouvoir tampon ;  
d'annuler l'activité microbienne ;  
de faire décroître fortement les réserves en eau.

Les cendres partielles, encore pourvues en éléments organiques et riches en bases, présentent un intérêt agricole certain. Elles ont l'inconvénient d'être rapidement éliminées par les érosions.

Ainsi, au cours de l'évolution d'une tourbe par drainage, deux horizons ont des caractères particulièrement favorables à la production agricole :

le premier se trouve en surface d'un profil correspondant à un stade moyen, obtenu par une évolution à longue échéance consécutive à la régression progressive de l'action de l'hydromorphie ;  
le second est la cendre partielle, obtenue par brûlage immédiat d'une tourbe récemment drainée.

Les divers stades évolutifs d'un sol tourbeux drainé trouvent leurs places dans la classification française des sols.

A mesure qu'une tourbe évolue, elle quitte la « sous-classe des sols hydromorphes organiques » pour passer dans la « sous-classe des semi-tourbeux », puis dans la « sous-classe des sols hydromorphes minéraux ».

Lorsque l'évolution est poussée à l'extrême, le sol devient un « sol ferrallitique », laissant apparaître qu'il a été soumis à une phase d'hydromorphie.

Il convient de ne pas confondre un sol « semi-tourbeux », décrit dans le premier chapitre, avec un « sol semi-tourbeux » obtenu par drainage d'une tourbe. Ces deux profils sont, en effet, différents et le sens de leur évolution amplifie leurs divergences avec le temps.

#### IV

L'expérimentation rizicole en vases de végétation et en cases lysimétriques, destinée à établir une hiérarchie des valeurs culturales des divers horizons d'une tourbe soumise au drainage, donne les résultats suivants :

la comparaison des aptitudes culturales de deux terres n'est possible que lorsque leur alimentation en eau est bien réglée. En effet, les conséquences d'une irrigation déficiente sont plus ou moins importantes en fonction de la nature de la terre ;



\* cette condition étant remplie, un sol donne :

- au stade I, un rendement faible de paddy (1 t/ha/an),
- au stade II, un bon rendement (7 t/ha/an),
- au stade III, un rendement moyen (4 t/ha/an),
- au-delà du stade III, un faible rendement (inférieur à 1 t/ha/an) ;

la cendre récente dérivée d'une tourbe au stade I est encore plus productive que l'horizon de surface du stade II. Les pronostics pouvant être formulés à partir des résultats analytiques sont ainsi confirmés ;

le dépôt limono-argileux d'alluvions récentes sur un sol tourbeux très évolué améliore ses aptitudes culturales.

Les variations de rendements provoquées par une évolution à longue échéance ou par un feu récent sont donc d'importance et entraînent des répercussions économiques sérieuses qui poussent à formuler les conseils pratiques suivants :

lorsqu'une tourbe est en début de drainage, il faut la brûler par couches successives de manière à former, chaque année, un horizon cendreux juste assez épais pour permettre une bonne récolte de riz. Ces brûlages doivent s'arrêter dès que les horizons fibreux ont disparu ;

laisser ensuite pendant quelques années le sol évoluer sans feu vers le stade II, puis freiner l'oxydation des matières organiques, s'effectuant par voies microbiennes, en noyant le sol en dehors de la période de riziculture ;

dès constatation d'un net ralentissement de la minéralisation (stade III), apporter au sol des éléments nutritifs (fumure organique et minérale) pour maintenir les rendements ;

si le sol devient improductif et exige pour sa régénération des investissements disproportionnés par rapport à la valeur de la récolte produite, il devra être abandonné et noyé.

La technique de mise en culture d'un sol tourbeux pour obtenir les meilleurs rendements, le plus largement étalés dans le temps, peut ainsi se résumer : précipiter l'apparition d'un profil correspondant à une évolution moyenne qui donne de bonnes récoltes, puis essayer de maintenir un équilibre entre le sol et les conditions pédoclimatiques imposées par la riziculture, équilibre aussi proche que possible de cette phase évolutive productive.

## INTERET DE LA CONNAISSANCE DES SOLS HYDROMORPHES ORGANIQUES MALGACHES

L'intérêt est double, il est à la fois scientifique et technique.

### I) INTERET SCIENTIFIQUE

Cette étude souligne la rapidité de l'évolution des sols hydromorphes qui peuvent, en quelques années seulement, subir des transformations profondes.

La majorité des caractères pédologiques des sols de bas-fonds, caractères qui règlent leurs aptitudes culturales, apparaît sous la dépendance quasi totale non seulement des taux de matières organiques, mais aussi de leur état d'altération, état qui est à tous les instants en cours de modification.

Ainsi, au moment de l'établissement d'une carte pédologique, il convient de fournir des indications sur les morphologies antérieures des profils et dans la mesure du possible sur les conséquences des variations futures de l'intensité de l'hydromorphie. Cette notion d'instabilité des caractères d'un sol, particulièrement sensible en terres hydromorphes, existe pour des sols en apparence plus stables et mériterait d'être davantage prise en considération.

### II) INTERET PRATIQUE

La connaissance de l'ampleur des tassements par drainage des sols très hydromorphes permet de prévoir la topographie des rizières dérivées de tourbes, d'orienter ainsi l'implantation du réseau de drainage et de calculer l'importance des planages à réaliser, qui interviennent largement sur le prix de revient de l'hectare mis en valeur.

Toute utilisation irrationnelle d'un sol tourbeux, conduisant à un gaspillage des réserves naturelles, il importe de ne drainer le marais qu'après avoir établi avec soin un programme de mise en valeur.

La contribution qui vient d'être apportée à la connaissance des sols de marais malgaches atteindrait le but fixé si l'utilisation des résultats acquis pouvait améliorer le revenu du paysan malgache.

Fig. 73 et 74

RIZIERES EN COURS DE REPIQUAGE (STADE III)

(Environ de Tananarive)



## BIBLIOGRAPHIE

## I) CONSTITUTION DU MATERIEL PARENTAL

## a) Climat.

FOURNIER (F.). Les facteurs de l'érosion du sol par l'eau en Afrique Occidentale Française.  
*C.R. hebdomadaires des séances de l'Acad. Agric. de France* (Paris), 1955, nov., n° 15, p. 660-5.

RAVET (J.). Notice sur la climatologie de Madagascar et des Comores.  
*Mémoires de l'IRSM*, 1952, série D, tome IV, fasc. 1, p. 1-36.

—. Les pluies à Madagascar et aux Comores.  
*Publication du Service Météorologique de Madagascar*, 1958, fév., n° 26.

## b) Végétation.

BOSSER (J.). Les pâturages naturels de Madagascar.  
*Mémoires de l'IRSM* (Tananarive), 1954, série B, tome V, p. 65-77, 6 tabl., bibl., 5 réf.

—, ROCHE (P.). Notice sur les cartes d'utilisation des sols.  
*Feuilles d'Andilamena*. Publication de l'IRSM (Tananarive), 1956.

DANDOUAU (A.). Catalogue alphabétique des noms malgaches des végétaux.  
1909 (texte ronéotypé).

HUMBERT (H.). Principaux aspects de la végétation de Madagascar.  
*Mémoires de l'Acad. Malgache*, 1927, 5, 79, p. XLI, pl.

PERNET (R.). Evolution des sols de Madagascar sous l'influence de la végétation.  
*Mémoires de l'IRSM*, série D (Paris), 1954, tome 6, p. 201-419, 63 fig., 4 pl. h.t., bibl. 279 réf.

PERRIER DE LA BATHIE (H.). *Revue de botanique appliquée*, 1928, n° 8, p. 449-57, 631-42, 696-707.

## c) Géologie.

BAISERIE (H.). L'altération des roches et la formation des sols à Madagascar.  
*Bull. du Bureau d'Etudes Géologiques et Minières Colon.*, 1939, n° 12.

—. La géologie de Madagascar.  
*Ann. géologique du Service des Mines* (Tananarive), 1946.

BASSE (E.). Histoire géologique de Madagascar.  
*Mémoires de l'IRSM*, 1949, série D, tome II, p. 53-68.

ERHART (H.). Sur la nature géologique des sols de Madagascar.  
*C.R. de l'Acad. des Sciences*, 1929, tome 188.

—. Altération des roches et mode de formation des principaux types de sols. Etude des altérations superficielles.  
*Bull. du Bureau d'Etudes Géologiques et Minières Colon.*, 1939, n° 12.

—. La genèse des sols en tant que phénomènes géologiques.  
Paris, Masson et C<sup>ie</sup>, 1956, in-8°, 90 p.

## d) Altération des sols et érosion.

BONIFAS (M.). Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique.  
*Mémoires de l'Université de Strasbourg*, 1960, n° 17 (Service de la Carte géologique d'Alsace et de Lorraine).

FOURNIER (M.). Climat et érosion. La relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques.  
Paris, Presses Universitaires Françaises, 1960, 203 p.

HUMBERT (H.). La dégradation des sols à Madagascar.  
*Bull. agric. du Congo Belge* (Bruxelles), 1949, juin, vol. 40, n° 2, p. 1141-62 (C.R. Conf. Goma, Comm. n° 73).

RIQUIER (J.). Etude sur les « lavaka ».  
*Mémoires de l'IRSM*, série D (Paris), 1954, tome 6, p. 169-89, 24 fig., 11 pl. h.t., bibl. 2 réf.

SEGALEN (P.). L'érosion des sols à Madagascar.  
*Bull. agric. du Congo Belge*, 1949 (Comm. n° 19), p. 1127-37, 1 carte.

## e) Formation des sols de bas-fond.

VAN HEUVELN (B.), JONGERIUS (A.), PONS (L.J.). Soil formation in organic soils (Formation des sols organiques).  
Internat. (7th) Congress of Soil Science (Madison), 1960, vol. IV, p. 195-204, 2 fig., 2 phot., bibl. 8 réf.



## II) DEFINITION D'UNE CHAÎNE DE SOLS, TYPIQUE DES DEPRESSIONS

### a) Caractères morphologiques et physico-chimiques.

AUBERT (G.). Les sols hydromorphes d'Afrique Occidentale Française.

Congrès (5<sup>e</sup>) Intern. de la Scienc. du Sol (Léopoldville), 1954, vol. IV, comm. V, p. 447-50.

BRUNEL (A.). Traité pratique de Chimie végétale.

Tourcoing (Nord), 1948, tome II, 515 p.

DIDIER DE SAINT-AMAND (R.). Listes des prospections et études analytiques réalisées à Madagascar, se rapportant à des sols hydromorphes.

- Etude des sols de la région d'Ambatomanoina, Madagascar, 1954, 28 cm, 54 p. graph., 1 carte au 1/100.000 h.t. (rapport diffusé par l'IRSM).
- Rapport de tournée sur la basse plaine alluviale de la Mananjeba, Madagascar, 1954, 28 cm, 28 p., 1 carte au 1/50.000 (rapport diffusé par l'IRSM).
- Etude des sols hydromorphes de la région de Laniera (environ de Tananarive), Madagascar, 1955, 28 cm, 19 p. graph. tabl. h.t., 1 carte au 1/40.000 (rapport multigraphié par le Centre de la Recherche Agronomique du Lac Alaotra [CRALA]).
- Pédologie de la basse vallée de l'Andromba, Madagascar, 1955, 28 cm, 22 p. graph. tabl. h.t., 1 carte au 1/40.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Les sols de la plaine de l'Izafo, Madagascar, 1955, 28 cm, 18 p. tabl. h.t., 1 carte au 1/40.000 h.t. (rapport multigraphié CRALA).
- Les sols de la propriété de Mampiteny II, Madagascar, 1955, 28 cm, 9 p., tabl. h.t., 1 carte au 1/5.000 h.t. (rapport multigraphié CRALA).
- Pédologie de la plaine de Fizakana, Madagascar, 1955, 28 cm, 28 p., fig., 1 tabl. h.t., 1 carte au 1/20.000 h.t. (rapport multigraphié CRALA).
- Contribution à l'étude des sols de la cuvette d'Andapa, Madagascar, 1956, 28 cm, 18 p., 4 phot., tabl., graph., 1 table h.t., 2 cartes h.t. dont 1 au 1/100.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Les sols du marais de Tangaina, Madagascar, 1956, 28 cm, 14 p., 1 carte h.t. au 1/10.000, 1 tabl. h.t. (rapport multigraphié CRALA).
- Etude pédologique du périmètre irrigable sur la rive droite de la Taheza, Madagascar, 1956, 28 cm, 24 p., fig., 1 tabl. h.t., 1 carte au 1/50.000 h.t. (rapport multigraphié CRALA).
- Etude pédologique de la plaine de Firavahana, Madagascar, 1956, 28 cm, 17 p. fig., graph., 1 tabl. h.t., 2 cartes h.t. dont 1 au 1/10.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Pédologie des vallées de Miarinarivo, Antombofito, d'Antsomitoty, d'Andriatsiazo et d'Angodongodona, Madagascar, 1956, 28 cm, 24 p. fig., tabl., 2 cartes au 1/20.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Les sols salés de la baie de Narinda, Madagascar, 1957, 28 cm, 21 p., 1 carte au 1/40.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Contribution à l'étude de la vallée de la Mania (Canton de Soavina), Madagascar, 1957, 28 cm, 46 p. tabl. fig., 2 cartes h.t. dont 1 au 1/20.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Pédologie de la concession CGOT d'Analaiwa, Madagascar, 1957, 28 cm, 36 p., 2 cartes, l'une au 1/5.000, l'autre au 1/10.000 (rapport multigraphié CRALA).
- Etude de la concession d'Ambodiriana en vue de la culture du thé, Madagascar, 1959, 28 cm, 40 p., 2 cartes au 1/33.333 (rapport diffusé par l'IRAM).
- Aptitude à la culture du cocotier des sols s'étendant de Fenerive à Foulpointe, Madagascar, 1959, 28 cm, 10 p., 1 carte au 1/80.000 (rapport diffusé par l'IRAM).
- Contribution à l'étude pédologique du Périmètre de Colonisation n° 23, Madagascar, 1960, 28 cm, 75 p., 1 carte au 1/40.000 (rapport diffusé par l'IRAM).
- Etude pédologique des Marais d'Ifanga, Madagascar, 1962, 28 cm, 31 p. tabl., cartes dont 1 au 1/20.000 (rapport diffusé par l'IRAM).
- Contribution à l'étude pédologique de la plaine de la basse Ikopa (Station agricole d'Andranovaky), Madagascar, 1962, 28 cm, 23 p. tabl., 1 carte au 1/10.000 h.t. (rapport diffusé par l'IRAM).
- Méthodes d'analyses physiques et chimiques des terres en application au laboratoire de la Station de l'Alaotra, Madagascar, 1958.  
*L'Agronomie Tropicale* (janv.-fév.).
- FRITZ (J.). Les sols cultivés en manioc dans la région de Moramanga.  
*Riz et Riziculture*, 1957, 1<sup>er</sup> trim., 32 p. tabl., fig., 1 carte h.t.
- GOARIN (S.). Contribution à l'étude des sols destinés à la culture du coton sur la rive gauche de la basse vallée de Fiherenana, Madagascar, 1955, 28 cm, 23 p., 1 carte au 1/40.000 (rapport multigraphié CRALA).
- ROCHE (P.). Prospection pédologique en vue de l'établissement d'un centre multiplicateur de semence de riz dans la province de Fianarantsoa, Madagascar, 1955, 28 cm, 10 p. (rapport multigraphié CRALA).

- , —, GOARIN (S.). Prospection pédologique effectuée sur le plateau d'Ambohimiarivo, près d'Antsirabe, Madagascar, 1955, 28 cm, 12 p. (rapport multigraphié CRALA).
- , SEGALIN (P.). Carte pédologique au 1/50.000 des plaines d'Ambilobe, Madagascar, 1954 (rapport publié par l'IRSM).
- FOURNIER (F.). Les sols du Continent africain.  
Paris, UNESCO, 1961 (NS/NR/2).
- GODINHO GOUVEIA (D.H.). The soils of Zambegia (Sols de Zambegia, Mozambique).  
Congrès (5<sup>e</sup>) Intern. Science du Sol (Léopoldville), 1954, vol. IV, comm. V, p. 419-23.
- HERVIEU (J.). Géographie des sols malgaches. Essai synthétique.  
Paris ORSTOM 1966 (rapport multigraphié de 59 pages).
- KAMOSHITA (Y.). Soil types in Japanese paddy rice field.  
Congrès (5<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Léopoldville), 1954, vol. IV, p. 137-9.
- KILIAN (J.), RADRIAMAMONJIZAKA (J.L.). Etude pédologique de la plaine du Bas-Faraony, Madagascar, 1966.  
*L'Agronomie Tropicale*, n<sup>os</sup> 6-7, p. 753-77.
- MOUREAUX (C.). Les sols de marais d'Ambila-Manakara.  
*Mémoires de l'IRSM*, série D, 1955, tome 7.
- MUIR (A.). Gleying in soil.  
Rothamsted, Exper. stat. report, 49, 1955.
- NGO-CHAN-BANG. Etude pédologique de la vallée de l'Andranomasina et diagnostic des carences des sols par la méthode des vases de végétation.  
Rapport de stage de pédologie ORSTOM. Tananarive, IRAM, 1964, 176 pages multigraphiées.
- PERNET (R.). Bibliographie pédo-agronomique et répartition des types de sols à Madagascar.  
*Mémoires de l'IRSM*, 1951, fasc. 2, p. 293-343, bibl.
- PLAISANCE (G.). Les sols à simili-gley.  
*Bull. de l'AFES*, 1956, fév. n<sup>o</sup> 73.
- RIQUIER (J.). Les sols sur alluvions récentes et anciennes du Lac Alaotra.  
Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Paris), 1956, vol. E, comm. V, p. 514-6, tabl., bibl. 2 réf.
- , SEGALIN (P.). Notice sur la carte pédologique du Lac Alaotra.  
*Mémoires de l'IRSM*, 1949, série D, tome 1, fasc. 1.
- STEPHEN (C.G.). A manual of Australian Soils.  
Melbourne, CSIR, 1953.
- TERCINIER (G.). Rapport sur les sols de la plaine du Haut-Sambirano, région de Bemanevika.  
*Mémoires de l'IRSM* (Tananarive), 1953, série D, tome V, p. 203-29, tabl., schémas, carte.

#### b) Caractères minéralogiques.

- CAILLÈRE (S.), HENIN (S.). Proposition pour normaliser la nomenclature des minéraux argileux.  
*Bull. du Groupe Franç. des Argiles*, 1958, IX, 4.
- HERVIEU (J.).  
Contribution à l'étude de l'alluvionnement en milieu tropical.  
Les facteurs de la sédimentation continentale, les produits de l'érosion, les sols alluviaux sur le versant occidental de Madagascar.  
Paris, ORSTOM, 1966, 521 pages multigraphiées. (Thèse pour obtenir le grade de Docteur ès Sciences naturelles, Paris.)
- HOORE (J.D'). Clay mineral and gibbsite crystals as clues to the mode of formation of ancient sesquioxide accumulation zones.  
Congrès (5<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Léopoldville), 1954, vol. IV, p. 45-8.
- MILLOT (G.). Genèse et synthèse des Argiles. Colloque Internat. du CNRS, 1961, 3-6 juill., n<sup>os</sup> 1-5.  
—, Géologie des Argiles. Masson, 1964, 500 p.
- SEGALIN (P.). Etude des sols dérivés de roches volcaniques basiques à Madagascar.  
*Mémoires de l'IRSM*, 1957, série D, tome 8, p. 1-181, fig., tabl., 9 pl. h.t., bibl. 223 réf. (Thèse Faculté des Sciences de Paris.)
- X-Ray identification and crystal structure of minerals. London, G.W. Brindley, 1951.
- Alphabetical and grouped numerical index of X-Ray diffraction data. Philadelphia, American Society for testing materials, 1953.

#### c) Classification des sols.

- AUBERT (G.). Classification des sols, utilisée dans les territoires tropicaux de l'Union Française.  
Conférence Inter afric. (2<sup>e</sup>) des Sols (Léopoldville), 1954, p. 705-8.
- , Premier essai régional de corrélation des classifications pédologiques utilisées en Afrique.  
*Bull. des Chercheurs de l'ORSTOM*, 1958, tome VIII, fasc. 2.

- , La classification des sols, utilisée par les pédologues français en zone tropicale ou aride. Colloque CCTA sur la classification des sols des régions intertropicales, Lovanium-Léopoldville, juin 1963, 9 p.
- , Classification des sols. Tableau des classes, sous-classes et sous-groupes de sols utilisés par la section de pédologie de l'ORSTOM, Paris, ORSTOM, 1965.
- , DUCHAUFOUR (Ph.). Projet de classification des sols. Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Paris), 1956, vol. E, comm. V, p. 597-604, tabl.
- , SEGALIN (P.). La classification des sols hydromorphes. *Bull. bibliog. de Pédologie*, Paris, 1965, tome XV, fasc. 4, 3 p.
- BASINSKY (J.J.). The Russia, approach to soil classification and its recent development (Les idées russes sur la classification des sols et leur récent développement). *The Journ. of Soil Science* (Oxford), 1959, mars 10-1, 14-25.
- DUCHAUFOUR (Ph.). Données nouvelles sur la classification des sols. *Ann. Ec. Eaux For.* (Nancy), tome 18, fasc. 4, p. 473-531.
- , Classification des sols. Comparaison de la classification américaine et de la classification française. *Pédologie*, 1961, vol. 11, n° 1, p. 138-147.
- , La cartographie des sols et des stations à but agronomique et à but forestier. *Pédologie*, 1961, vol. 11, n° 1, p. 148-157.
- , Précis de Pédologie. 1<sup>re</sup> et 2<sup>e</sup> édit., Paris, Masson et C<sup>ie</sup>, 1960 et 1965.
- DURAND (J.H.). La classification des sols, utilisée pour les cartes pédologiques en Algérie. Congrès (5<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Léopoldville), 1954, vol. IV, p. 168-74.
- DESAUNETTES (J.R.). Classification pratique des sols hydromorphes (Bas-Rhône et Languedoc). *Bull. de l'AFES*, 1958, sept., n° 8.
- HOORE (J.D'). Carte des sols d'Afrique au 1/5.000.000. Colloque CCTA sur la classification des sols des régions inter-tropicales, Lovanium-Léopoldville, juin 1963, 13 p.
- KAMOSHITA (Y.). Soil types in Japanese paddy rice field. Congrès (5<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Léopoldville), 1954.
- MARBET (C.F.). The importance of organic matter in the classification of soils (Importance de la matière organique dans la classification des sols). *J. Amer. Soc. Agro.*, 23, p. 1056-1057.
- MUIR (J.W.). The general principles of classification with reference to soils (Les principes généraux de la classification appliquée aux sols). *J. Soil Science*, 1962, mars, vol. 13, n° 1, p. 22-30.
- PAPADAKIS (J.). Some considerations on soil classification: the 7th approximation (Quelques considérations sur la classification des sols : la 7<sup>e</sup> approximation). *Soil Science*, 1962, août, vol. 94, n° 2, p. 115-119.
- STEPHENS (C.G.). The classification of Australian soils. Congrès (5<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Léopoldville), 1955, n° 4, p. 155-60.
- TAVERNIER (R.). Introduction à la classification américaine : 7<sup>e</sup> approximation. 1965, Gand (Cours à l'Université de l'Etat, Gand, Belgique), 39 p. multigraphiées.
- VAN WAMBEKE (A.R.). Criteria for classifying tropical soils by age (Critères de la classification chronologique des sols tropicaux). *J. Soil Science*, 1962, mars, vol. 13, n° 1, p. 124-32.
- WOODING ROBINSON (G.). Soils their origin, constitution and classification. 3<sup>e</sup> éd., London, Murby and Co., 1951.
- Soil Classification. A Comprehensive System. 7th Approximation. Washington 1960, USDA, 265 p. (U.S. Government Printing Office DC 20.402).
- Additif à la 7<sup>e</sup> approximation :
  - 1) USDA (Washington DC. 20.250), 1964, 104 p.
  - 2) USDA (Washington DC. 20.250), 1966, 100 p.

### III) CONSEQUENCE D'ORDRE PEDOLOGIQUE CONSECUTIVE AU DRAINAGE DES DEPRESSIONS

#### 1) EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE

##### a) Caractères morphologiques et physico-chimiques.

- DIDIER DE SAINT-AMAND (R.). Se référer à la liste des études données précédemment qui intéressent aussi ce chapitre.
- , La vocation rizicole des sols de marais de Madagascar et l'évolution pédologique consécutive à leur mise en valeur. (Comm. internat. du Riz, Ceylan, 1959.)
  - , Evolution pédologique consécutive au drainage des sols hydromorphes à Madagascar. Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. des Irrigations et du Drainage (Madrid), 1960.



- DUCHAUFÔUR (Ph.). Propriété des complexes humiques dans différents types de sols.  
*Ann. Ecole Nat. Eaux et Forêts* (Nancy), tome 14, fasc. 1, p. 43-64, 4 tabl., bibl. 19 réf., 1954.
- L'action des divers types d'humus sur les processus d'entraînement dans le sol forestier.  
*Revue forestière Fr. Nancy*, n° 12, p. 887-97, tabl., bibl. 16 réf.
  - Evolution de l'aluminium et du fer complexés par la matière organique dans certains sols.  
*Science du sol* (Versailles), 1<sup>re</sup> semaine 1964, 14 p.
  - DOMMERGUES (Y.). Etude des composés humiques de quelques sols tropicaux et subtropicaux.  
*Sols africains*, 1963, janv.-avril, vol. VIII, n° 1, 18 p.
  - JACQUIN (F.). Note sur l'évolution de la matière organique dans les sols.  
*C.R. hebd. des séances de l'Acad. d'Agr. de France*, 1959, n° 10, p. 516-9, bibl. 10 réf.
  - —. Nouvelles recherches sur l'extraction et le fractionnement des complexes humiques.  
Nancy 1966, *Bull. de l'Ecole Nat. Supér. Agron. de Nancy*, tome VIII, fasc. I, 24 p.
- HARADA (T.), HASHIMOTO (H.), YOSKIZAWA (T.). The relation-ship of readily decomposable organic matter to the colloidal complexes of paddy soil (Influence de la matière organique facilement décomposable, dans le sol des rizières, sur ses constituants colloïdaux).  
*Soil Plant Food*, 1955, n° 1, p. 49-50.
- HARDON (H.J.). Factors governing the organic matter and the nitrogen content of tropical soils (Facteurs contrôlant la matière organique et la teneur en azote des sols tropicaux).  
Korte Meded Alg. Proefsta, Lanolb, 1936.
- HENIN (S.), MONNIER (G.), COMBEAU (A.). Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols.  
Paris, *Ann. Agr. INRA*, 1958, n° 1, p. 71-90.
- IYENGAR (B.A.S.), SUBRAHMANYAN (V.). Investigations of the rôle of organic matter in plant nutrition. Influence of fermentable organic matter on the transformation of iron in the swamp soil (Recherche sur le rôle de la matière organique fermentescible sur les transformations du fer dans les sols marécageux).  
*Proc. Indian, Acad. Sci.*, 1935, n° 1, p. 868-92.
- JEWITT (T.N.). The distribution of organic matter in depth in some tropical seasonally flooded soils (Répartition de la matière organique en profondeur dans quelques sols tropicaux saisonnièrement inondés).  
*Journal of Soil Science* (Baltimore), 1952, vol. 3, n° 1, p. 63-7.
- KONONOVA (M.M.). Principaux résultats des recherches sur l'humus effectuées en URSS au cours de ces trente dernières années.  
*Potchvorédénie* (Moscou), 1947, n° 7, p. 418-599 (texte russe).  
Soil organic matter. Pergamon Press, Oxford-London-New York-Paris, 1961, 500 p., tabl., graph., phot.
- KUMADA (K.). Humus of paddy soils. Types of humic acid (Humus des sols de rizières. Types d'acide humique).  
*Journ. Sci. Soil, Man-Japan*, 1951, 21, p. 11-174.
- MAIGNIEN (R.). Contribution à l'étude du cuirassement des sols en Guinée Française.  
Strasbourg, 1958, 2 vol. in-4°, 311 p., tabl. bibl. 22 p. (Thèse doctorat ès sciences naturelles, Faculté des Sciences de l'Université de Strasbourg.)
- MOUREAUX (C.). Rapport sur la collectivité rurale d'Androharanamaitso.  
*Mémoires de l'IRSM* (Tananarive), 1953, série D, tome V, p. 173-91, tabl. carte.
- , RIQUIER (J.). Les sols submergés de l'Alaotra.  
*Mémoires de l'IRSM*, 1951, série D, tome III, fasc. 1.
- NEYRPC (Société). Etudes préliminaires. Rapport général concernant le périmètre n° 23 du Lac Alaotra, Madagascar, 1950.
- . Hydrologie du Lac Alaotra (3 tomes), Madagascar, 1950.
  - . Résultats des sondages de l'axe de drainage de Mahakary (Aménagement de la région du Lac Alaotra), Madagascar, 1950.
- PÉRICAUD (S.). La dynamique de l'azote dans les sols hydromorphes.  
*Bulletin de l'Assoc. Franc. pour l'étude du sol* (Versailles), 1963, janv., n° 1, p. 1-56, bibl. 153 réf.
- ROCHE (P.). Les sols de marais récemment récupérés au Lac Alaotra, Madagascar.  
*L'Agronomie Tropicale* (Nogent-sur-Marne), 1952, vol. 7, n° 1, p. 43-63, fig. tabl. bibl. 4 réf.
- SAUNDER (D.H.). Détermination of available phosphorus in tropical soils by extraction with sodium hydroxide.  
*Soil Science*, déc. 1956, p. 457.
- SEGALEN (P.). Le fer dans les sols.  
Paris ORSTOM, 1964, 151 p.
- . Les produits alumineux dans les sols de la zone tropicale humide.  
Première partie : Les produits alumineux.  
*Cahiers de Pédologie ORSTOM* 1965, vol. 3, fasc. 3, p. 149.  
Deuxième partie : Les sols de la zone inter-tropicale humide et la genèse des produits alumineux.  
*Cahiers de Pédologie ORSTOM* 1965, vol. 3, fasc. 3, p. 179.

- THOMANN (C.). Les différentes fractions humiques de quelques sols tropicaux de l'Ouest Africain.  
*Cahiers de Pédologie*, vol. II, fasc. 3, 30 p.
- YAMANE (I.), OMUKAI (S.). On soil humus of paddy fields in Akita prefecture (Sur l'humus des rizières de la région d'Akita).  
*Sci. rep. res. inst. Tohoku Univ.*, 1954, série D 6, p. 13-24.
- b) Caractères biologiques.**
- COPPIER (O.), POCHON (J.). Pouvoir ammonifiant réel et potentiel du sol dans ses rapports avec la microflore.  
Paris, août 1952, *Annales de l'Institut Pasteur*, tome 83, n° 2, p. 200.
- DELAMARE DE BOUTTEVILLE. Microfaune du sol des pays tempérés et tropicaux.  
Paris, Hermann et C<sup>ie</sup>, 1951.
- DIDIER DE SAINT-AMAND (R.). Influence d'une couverture herbacée dense sur la vie microbienne des sols de la Station agronomique du Lac Alaotra (Madagascar).  
Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol, Paris, 1956, vol. C, p. 431-8.
- Contribution à l'étude de la dégradation de l'humus par les micro-organismes du sol.  
Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol, Paris, 1956, vol. C.
- , GOARIN (P.). Influence des herbicides sur la vie microbienne d'un sol de rizière.  
*L'Agronomie Tropicale*, 1957, n° 4.
- DOMMERGUES (Y.). Contribution à l'étude de la dynamique microbienne des sols en zone semi-aride et en zone tropicale sèche, 1962.  
(Thèse de la Faculté des Sciences de Paris.)
- DUCHAUFOUR (Ph.), POCHON (J.), MANGENOT (F.), BARJAC (H. de). Etude pédologique des tourbes en incubation après neutralisation partielle.  
Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol, rapports (Paris), vol. C, III, n° 70, p. 419-23, tabl. bibl. 4 réf., 1956.
- , MANGENOT (F.). Recherches sur l'évolution expérimentale de certains humus.  
*INRA, Ann. Agro.* (Paris), n° 2, p. 159-81, graph. tabl. bibl. 20 réf., 1956.
- , —. Recherche sur l'évolution expérimentale de certains humus. Humification biologique et abio-logique.  
*INRA, Ann. Agro.* (Paris), vol. 8, n° 4, p. 573-83, tabl. graph. bibl. 12 réf., 1957.
- KÄUFFMANN (J.), BOQUEL (G.). Nouvelle méthode de détermination du pouvoir nitrificateur d'une terre.  
Paris, *Ann. de l'Institut Pasteur*, tome 81, p. 667.
- MANIL (P.), CULOT (J.-P.), BROUWERS (L.). Contributions à l'analyse du sol par voie microbiologique.  
*Bull. de l'Inst. Agron. et des Stat. de Recherches de Gembloux* (Bruxelles), 1956, vol. 24, n° 2, p. 142-207, tabl. graph. bibl. 6 réf.
- MOUREAUX (C.). La microbiologie des sols et ses applications agronomiques.  
*Rev. Agric. et Suc. de l'île Maurice* (Port-Louis), 1955, nov.-déc., vol. 34, n° 6, p. 252-8.
- La microbiologie dans l'étude des sols.  
*Le Naturaliste Malgache* (Tananarive), 1956, tome VIII, fasc. 2, p. 165-77.
- Activité microbiologique et ses variations dans l'année, en divers sols des Hauts-plateaux malgaches.  
Tananarive, 1959, *Mémoires de l'IRSM*, série D, tome IX, p. 121-99.
- OKUDA (A.), YAMAGUCHY (M.). Nitrogen fixing micro-organism in paddy soil. Characteristical of the nitrogen fixation in paddy soil.  
*Soil plant food*, 1955, n° 1, p. 102-4.
- POCHON (J.). Manuel technique d'analyse microbiologique du sol.  
Paris, Masson et C<sup>ie</sup>, 1954.
- , BARJAC (H. de). Traité de microbiologie des sols.  
Paris, Dunod, 1958.
- WINOGRADSKY (S.). Microbiologie du sol.  
Paris, Masson et C<sup>ie</sup>, 1949, in-8°, 862 p. pl. et fig.
- YADAV (J.S.P.), SHRIKHANDE (J.C.). Nitrification in the presence of organic matter (La nitrification en présence de matières organiques).  
*Proc. Nat. Acad. Sci. India*, 1955, sect. A, 24, 5, p. 557-61.

## 2) EVOLUTION A BREVE ECHEANCE PAR ACTION IMMEDIATE D'UN BRULAGE

### Caractères morphologiques, physico-chimiques et biologiques.

- AUSTIN (R.C.), BAISINGER (D.H.). Some effects of burning on forest soils of western Oregon and Washington (Quelques effets du brûlis sur les sols de forêts de l'Ouest de l'Oregon et de Washington).  
*J. For.*, 1955, 53, p. 275-80.
- BEADLE (N.C.W.). Soil temperatures during forest fires and their effects on the survival of vegetation (Températures du sol pendant les feux de forêt et leurs effets sur la végétation restante).  
*J. of Ecology*, 1940, 28 (1), p. 180-92.

- BOUTEYRE<sup>\*</sup>(G.). Nos sols.  
*Bull. Bureau des Sols de l'Afr. Equat. Franç.*, 1958, n° 3 et 7.
- DUCHAUFOUR (Ph.). Note sur l'influence de l'incinération sur l'évolution de l'humus.  
*Rev. Forest. Franç.* (Nancy), mai 1954, n° 5, p. 316-20.
- GRIFFIT (A.-L.). Les effets de la régénération artificielle du sol par le brûlis en Inde.  
*Ind. For.*, 1947, 73 (12), p. 526-8.
- GUILLEMIN (R.). Feux de brousse et fertilité des sols tropicaux.  
*Nos sols* (Brazzaville), 1958, janv., n° 6, p. 29-39, bibl. 9 réf.
- HENRARD (P.). Réaction de la microflore du sol aux feux de brousse. Essai préliminaire exécuté dans la région de Kisantu.  
 Bruxelles, INEAC, 1939, 23 p (série scientifique, n° 20).
- JAHN (E.). Auswirkungen von Waldbraden mit spezieller berucksichtigung der Veranderungen im Boden und des Bodentierlebens (Les effets des feux de forêts, particulièrement sur les sols et la faune du sol).  
*Natur. und Land* (Wien), 1955, 41, 10-12.
- JANSON (J.R.). Some effects of fire upon Douglas - fir soils in the big belt mountains.  
*Proceedings of the Montana Academy of Sciences*, 1949, 9, p. 17-21, bibl. 3 réf.
- JEFFREYS (M.D.W.). Feux de brousse.  
*Bull. de l'Inst. Franç. d'Afr. Noire*, 1951, tome XIII, n° 3, p. 682-732.
- LE BORGNE (E.), MONNIER (G.). Influence du feu sur certaines propriétés du sol.  
*C.R. Acad. Sc.* (Paris), 1959, 9 mars, tome 248, n° 10, p. 1549-51, tabl. bibl. 3 réf.
- MASSON (H.). La température du sol au cours d'un feu de brousse au Sénégal.  
*Bull. Agric. du Congo Belge* (Bruxelles), 1949, juin, vol. 40, n° 2, p. 1933-40, graph. (C.R. Conf. Goma, comm. 117).
- PERNET (R.). L'humus forestier et son évolution après destruction du couvert végétal.  
*Mémoires de l'IRSM* (Paris), série D, 1952, n° 2, p. 297-345, graph. bibl. 62 réf.
- PITOT (A.). Feux sauvages, végétation et sol en AOF.  
*Bull. IFAN* (Dakar), 1953, oct., tome XV, n° 4, p. 1359-83.
- , MASSON (H.). Quelques données sur la température au cours des feux de brousse aux environs de Dakar.  
*Bull. IFAN*, 1951, 13 (3), p. 711-32.
- RENARD (M.). Les feux de brousse du Soudan.  
*Bull. Agr. du Congo Belge* (Bruxelles), 1949, juin, vol. 40, n° 2, p. 1919-32 (C.R. Conf. Goma, comm. 67).
- RIQUIER (J.). Etude d'un sol de tavy et d'un sol de forêt primaire à Périnet.  
 1953, 5, p. 75-92, *Mémoires de l'IRSM*.
- ROBYNS (W.). Considération sur les aspects biologiques du problème des feux de brousse au Congo Belge et au Ruanda-Urundi.  
*Bull. Inst. Col. Belge*, 1938, 9 (C.R. in *Bull. Agric. du Congo Belge*, 29, 3).
- TROUTNEV (A.G.), BYLINSKALA (V.N.). Influence de la calcination sur la variation des propriétés du sol.  
*Pédologie Akad. Nank SSSR*, 1951 (4), (trad. CEPD, n° 453).
- VIGNAL (P.). La disparition de la forêt malgache des Hauts-Plateaux.  
*Bois et forêts des Tropiques* (Nogent-sur-Marne), 1956, sept.-oct., n° 49, p. 3-8, fig.
- VLAMIS (J.), SCHULTZ (A.M.), BISWEL (H.H.). Burning and sol fertility (Le brûlis et la fertilité du sol).  
*Calif. Agric.*, 1935, 9 (3), p. 7.
- WEST (O.). Veld management in the dry summer rainfall bushweld. Prepared for the trustees of the Grasses and pastures of S.A.,  
 Book Fund, 16 p.

### 3) CLASSIFICATION DES TOURBES EVOLUANT A LONGUE OU A COURTE ECHEANCE

- PONS (L.J.). Soil genesis and classification of reclaimed peat soils in connection with initial soil formation (Genèse des sols et classification des tourbes asséchées [gley et pseudo-gley] en relation avec la formation initiale du sol).  
 Internat. (7th) Congress of Soil Science (Madison), 1960, vol. III, p. 205-11.
- SCHELLING (J.). New aspects of soil classification with particular reference to reclaimed hydromorphic soils (Nouveaux aspects de classification des sols avec référence particulière aux sols hydromorphes asséchés).  
 Internat (7th) Congress of Soil Science (Madison), 1960, vol. IV, p. 218-24.



#### IV) INFLUENCE DE L'ÉVOLUTION PROVOQUÉE PAR DRAINAGE D'UNE TOURBE SUR SON APTITUDE A NOURRIR LES VÉGÉTAUX

- ANGLADETTE (A.). Le Riz.  
Paris, Maisonneuve et Larose, 1966, 931 p. (Collection Techniques agricoles et productions tropicales, n° 5, 6, 7.)
- BARBIER (G.), BOISCHOT (P.). Recherches sur l'action fertilisante de la tourbe.  
*Ann. Agron.*, 1946, tome XVI, n° 3, p. 271.
- BASTISSE (E.M.). Etude de quelques éléments minéraux fixés dans les sols sous forme organique.  
*INRA, Ann. Agron.* (Paris), 1957, juill.-août, vol. 8, n° 4, p. 585-603, tabl.
- BERNARD (E.A.). Sur diverses conséquences de la méthode du bilan d'énergie pour l'évapotranspiration des cultures ou des couvertures végétales naturelles.  
*Sols africains*, 1956, vol. 4, n° 1, p. 103-20, 2 pl., bibl. 9 réf.
- BLANCHET (R.). Actions directes et indirectes de la matière organique humifiée sur la nutrition des végétaux vasculaires (Revue bibliographique).  
*Ann. Agron.*, *INRA*, série A (Paris), 1958, juill.-août, n° 4, p. 499-532, tabl., bibl. 72 réf.
- BOSSER (J.), PERNET (R.). Nutrition végétale et humus. Engrais et équilibre de la nutrition végétale. Rôle de l'humus dans la nutrition végétale. Répercussion des différents traitements sur le sol et sur la composition chimique des récoltes.  
*Mémoires de l'IRSM*, série biologie végétale, 1952, tome IV, fasc. 2, p. 259-91, bibl. 65 réf.
- BOURAKOV (Y.H.). Utilisation de la tourbe pour la fumure de la pomme de terre sur les sols sableux.  
*Sov. Agr.*, n° 12, p. 50-4.
- BOUYER (S.). Considération d'ordre pratique sur l'étude de la fertilité des sols tropicaux.  
Paris, 1963, *L'Agronomie Tropicale*, n° 9, p. 933-8.
- CHABROLIN (R.). Le rôle de l'eau dans la rizière.  
*Cahiers d'Agriculture Pratique Pays Chauds*, 1966, n° 3, p. 127-32, 2 fig. (D'après MOBURU YAMADA, News letters, sept. 1965).
- CHAMINADE (R.). Interaction entre l'humus et la fumure minérale.  
*Ann. Agro.*, 1951, série A, p. 618-21, 2 tabl.
- , BLANCHET (R.). Influence de l'humus sur la nutrition minérale de la plante dans le sol.  
*C.R. Acad. Sc.*, 1952, 234, 8, p. 878-9.
- COLLIER (D.). Principes de détermination de la fumure par l'analyse chimique du sol.  
*Bull. techn. d'inf. des ing. des Serv. agric.*, 1953, n° 81, juill.-août, p. 475-80, 1 tabl.
- COSTE (M.). Conservons l'humus dans nos rizières.  
*Bull. d'inf. Riziculture France*, 1956, juill.-août, n° 45, p. 12-3.
- DABIN (B.). Considérations sur l'interprétation agronomique des analyses de sol en pays tropicaux.  
Congrès (6<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol (Paris), 1956, vol. D, p. 403-9.
- DIDIER DE SAINT-AMAND (R.). Les vocations culturales des sols hydromorphes de la région de l'Alaotra et les problèmes d'entretien de la fertilité de ces sols.  
1962, Tananarive, IRAM, 14 p. multigraphiées.
- DUNCAN (B.D.). Multiple range and multiple F test.  
*Biometrics*, 1955, 11-142.
- DE (P.K.), PANIN (A.K.). Studies on the organic nitrogen of paddy soils. Distribution of "humic" and "nonhumic" nitrogen in organic matter.  
*Indian J. of Agric. Science* (New Delhi), 1936, vol. 6, p. 1081-6.
- LUPINOVICH (J.S.). Sol à excès d'humidité et sols tourbeux de marais, leur genèse, propriété et fertilité.  
1964, Congrès (8<sup>e</sup>) Internat. de la Science du Sol, Bucarest (Roumanie), p. 511-3, Académie des Sciences de Biélorussie.
- RIQUIER (J.). Formules d'évapotranspiration. En annexes, tables utilisables à Madagascar (10° à 25° de latitude Sud).  
*Cahiers ORSTOM, Pédologie*, 1963, n° 4, p. 33-50, tabl. bibl. 9 réf.
- ROCHE (P.), HERVIEU (J.), MOUREAUX (C.), DIDIER DE SAINT-AMAND (R.). Les sols à riz et leurs problèmes à Madagascar (résumé).  
PIOSA Congrès (3<sup>e</sup>), sect. D (Tananarive), 1957, oct.-nov., p. 13-4.
- , VELLY (J.), JOLIET (B.). Résumé des résultats d'essais de fertilisation sur riz à Madagascar, Alaotra, Station Agronomique, 1956, 38 p. mult., tabl., 16 pl. h.t., bibl. 9 réf.
- , —. Etude de l'évolution des éléments fertilisants apportés sur les principaux types de sols de la région du Lac Alaotra. Observ. 1950-1959 (Study of the evolution of nutrient elements applied to the main soil types in the Lake Alaotra region. Observ. 1950 to 1959).  
*L'Agronomie Tropicale* (10), 841-80, oct. 1962.
- , DUFOURNET (R.), RABETRANO (A.). Problèmes d'utilisation des engrais minéraux en rizière sur les Hauts-Plateaux de Madagascar.  
*L'Agronomie Tropicale*, Paris, 1964, vol. XIX, n° 4, 32 p.

- SOMALÂC. Le PC 23 (Lac Alaotra). Etude agronomique.  
Tananarive, IRAM (1964), 27 cm, 74 p. multigraphiées, 1 carte h.t., graph. h.t.
- VELLY (J.), ROCHE (P.). La fumure en riziculture malgache.  
Paris, 1966, *L'Agronomie Tropicale*, n° 4, p. 455-66.
- ZIZA (A.A.). Préparation et utilisation de la tourbe comme engrais.  
Br. Moscou, Ed. Agric. de l'Etat de Moscou, 1951, 62 p.

## ANNEXE

### 1) PREPARATION DES ECHANTILLONS

La méthode a été donnée à la page 293 (n° 3, mars 1968).

### 2) ANALYSE MECANIQUE

Méthode internationale avec pipetage suivant la méthode G.W. ROBINSON.

La destruction des matières organiques s'effectue avec du perhydrol MERCK bien stabilisé pour les pays chauds.

En utilisant, pour dispersant,  $\text{NH}_4\text{OH}$  ou le pyrophosphate, les résultats obtenus sont sensiblement les mêmes.

### 3) DENSITES APPARENTES

Le sol est prélevé à l'aide d'un cylindre d'un litre, tranchant à sa partie inférieure, pour ne pas modifier les structures.

La terre prélevée est séchée à l'étuve à  $105^\circ$ , puis pesée (poids = volume  $\times$  densité).

### 4) ELEMENTS ORGANIQUES

#### a) Carbone.

Dosé suivant la technique préconisée par ANNE. Le bichromate de potassium est ajouté sous forme cristallisée pour permettre l'oxydation complète des matières organiques (référence : « Précis de Pédologie », par Ph. DUCHAUFOR, Masson et C<sup>e</sup>, 1960, p. 382).

#### b) Matière organique totale.

Elle est calculée à partir du carbone ( $\text{C} \times 1,724 = \text{Mat. Org. tot.}$ ).

Des vérifications des valeurs trouvées pour la matière organique totale par perte au feu, compte tenu de l'eau de constitution des argiles, ont donné des résultats satisfaisants.

#### c) Azote total.

Méthode KJELDAHL, réalisée en matras de 50 cm<sup>3</sup>.

#### d) Humus.

##### $\alpha$ ) Méthode CHAMINADE.

Telle qu'elle a été décrite dans les *Annales Agronomiques* : « Sur une méthode de dosage de l'humus dans les sols ».

Le poids d'acide humique correspondant à un certain volume de permanganate a été déterminé suivant la méthode préconisée par BRUNEL dans son traité de Chimie végétale, tome II, p. 356.

##### $\beta$ ) Méthode au fluorure de sodium.

##### $\alpha'$ ) Extraction :

Prendre 5 g au maximum de sol (plus le sol est organique, moins la prise sera forte); les mettre au contact avec 100 cm<sup>3</sup> de fluorure de sodium à 1 %.

La suspension est agitée de façon intermittente, abandonnée une nuit, agitée à nouveau et filtrée. Prélever une fraction aliquote du filtrat (50 cm<sup>3</sup>).

##### $\beta'$ ) Précipitation des acides humiques :

La partie aliquote prélevée est additionnée de 1/10 de son volume d'acide sulfurique pur.

On laisse les flocons d'acides humiques se rassembler pendant deux heures environ et on filtre en utilisant du papier filtre sans cendre sur un ballon jaugé de 100 cm<sup>3</sup>.

Laver à plusieurs reprises le précipité à la pipette avec  $\text{SO}_4\text{H}_2$  environ N/10.

### γ') Titrage des acides fulviques :

Amener le filtrat à 100 cm<sup>3</sup> avec de l'eau distillée, prélever une fraction aliquote (cette fraction varie de 10 à 50 cm<sup>3</sup>, en fonction de la coloration ; les acides fulviques sont très peu colorés) et la mettre dans un Erlenmeyer. Neutraliser en présence d'un papier de tournesol à l'aide de lessive de soude au 1/2 en enlever le papier.

Mettre 20 cm<sup>3</sup> de MnO<sub>4</sub>K N/10.

La solution est portée sur plaque chauffante à l'ébullition exactement dix minutes. Elle est refroidie à 60°, puis on y ajoute : 10 cm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>H<sub>2</sub> au 1/5 et 20 cm<sup>3</sup> d'acide oxalique N/10 (il faut titrer l'acide oxalique par rapport au permanganate).

Titrer en retour par MnO<sub>4</sub>K N/10. Si le volume de MnO<sub>4</sub>K utilisé au titrage dépasse 12 cm<sup>3</sup>, l'essai est refait sur une fraction aliquote moins importante.

### δ') Titrage des acides humiques :

Le précipité lavé d'acide humique est redissous sur filtre par NaOH environ N/10. Le volume de la solution obtenue est porté à 100 cm<sup>3</sup> avec de l'eau distillée. Prélever une partie aliquote de cette solution et effectuer le titrage comme pour les acides fulviques, mais sans neutraliser avec NaOH au 1/2.

### ε') Calculs :

Un centimètre cube de MnO<sub>4</sub>K N/10 correspond à 1,02 mg d'acides fulviques ou d'acides humiques.

### γ) Méthode TIURIN modifiée.

Et adaptée au Laboratoire des Sols de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts (référence : « Précis de Pédologie », par Ph. DUCHAUFOR, Masson et C<sup>e</sup>, 1960, p. 385).

## 5) CARACTERES BIOLOGIQUES

### a) Cellulolyse.

#### α) En aérobiose.

Pour mettre en évidence les germes attaquant la cellulose en aérobiose, nous utilisons la technique mise au point par S. WINOGRADSKY qui est simple et favorable (référence : « Microbiologie des Sols », par S. WINOGRADSKY, Masson et C<sup>e</sup>, Paris, 1949).

Des boîtes de PÉTRI de 11 cm de diamètre sont remplies avec 30 cm<sup>3</sup> d'un mélange de silicate de sodium et d'acide chlorhydrique. Après la prise en masse, ce gel est dialysé à l'eau courante jusqu'à disparition des ions Cl<sup>-</sup>.

A ce support, dépourvu de matière minérale nutritive, sont additionnés 2 cm<sup>3</sup> de la solution standard minérale de WINOGRADSKY ainsi composée :

|                                        |                       |
|----------------------------------------|-----------------------|
| PO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> K ..... | 5 g                   |
| SO <sub>4</sub> Mg .....               | 2,5 g                 |
| NaCl .....                             | 2,5 g                 |
| Sulfate de fer ferreux .....           | 0,1 g                 |
| SO <sub>4</sub> Mn .....               | 0,1 g                 |
| Eau ordinaire .....                    | 1.000 cm <sup>3</sup> |

Comme source azotée, nous ajoutons 0,05 g de NO<sub>3</sub>K par boîte de PÉTRI. Les gels sont alors séchés à l'étuve à 60°. Après quoi, nous plaquons à leur surface du papier filtre « DURIEUX » traité aux acides chlorhydrique et fluorhydrique. Sur la cellulose, nous posons des grains de terre de la grosseur d'une tête d'épingle et nous déterminons le pourcentage des grains autour desquels le papier filtre est attaqué (grains positifs). Nous ensemencions en général avec 25 grains par boîte de PÉTRI de 11 cm de diamètre, pour éviter les contaminations.

Cette méthode donne une culture en surface, ce qui permet aux micro-organismes d'avoir largement l'oxygène qui leur est indispensable. Enfin, la cellulose est apportée sous forme fibreuse telle qu'elle se présente dans les débris végétaux retournant au sol.

Les cellulolytiques étant assez exigeants pour la valeur du pH et les différentes terres étudiées étant acides, nous acidifions la solution standard minérale de WINOGRADSKY en y ajoutant du PO<sub>4</sub>H Na<sub>2</sub>.

#### β) En atmosphère privée d'oxygène.

La méthode est identique à celle utilisée pour les cellulolytiques aérobie, mais les boîtes de PÉTRI sont placées sous des cloches de verre dans lesquelles l'oxygène est absorbé en renversant sous les cloches de la soude sur du pyrogallol.

#### γ) En anaérobiose.

Les techniques actuelles ne permettent que des conclusions comparatives sur l'activité de ces germes. Nous utilisons la plus courante (« Manuel technique d'Analyse microbiologique du sol », par J. POCHON, Masson et C<sup>e</sup>, 1954) qui consiste à introduire dans un tube à essai 6 cm<sup>3</sup> de la solution suivante :

|                                                            |                    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|
| Solution minérale de WINOGRADSKY modifiée à pH = 5,5 ..... | 5 cm <sup>3</sup>  |
| NO <sub>3</sub> (NH <sub>4</sub> ) .....                   | 0,2 g              |
| Peptone pepsique .....                                     | 0,1 g              |
| CO <sub>2</sub> Ca .....                                   | 1 g                |
| Eau .....                                                  | 95 cm <sup>3</sup> |

et une bande de papier filtre de 5 cm × 1 cm. L'ensemencement a lieu avec 0,5 cm<sup>3</sup> de terre. Le vide est réalisé dans les tubes à l'aide d'une pompe, puis ils sont scellés à la flamme.



L'activité des germes est déterminée en fonction de l'état de détérioration de la bande de papier filtre contenue dans chaque tube après un certain temps d'incubation à l'étuve à 28°.

REMARQUE. Les faibles volumes de terre sont déterminés à partir de pesées, car on connaît les densités.

## b) Fixation d'azote atmosphérique.

α) En aérobiose sur milieu solide (Technique de WINOGRADSKY).

Sur boîte de PÉTRI de 11 cm de diamètre contenant un gel de silice, nous ajoutons 2 cm<sup>3</sup> de la solution minérale de WINOGRADSKY additionnée de 0,5 % de CO<sub>3</sub>Ca. Quand nous voulons modifier le pH de cette solution, nous jouons sur les proportions du phosphate monopotassique et du phosphate disodique.

La solution nutritive est préparée à partir d'eau distillée pour défavoriser le développement des oligo-nitrophiles qui précède celui des azotobacters.

Sans cette précaution, des champignons blancs à filaments mycéliens pénétrant dans le gel se développent. Leur présence entrave le développement des bactéries (antagonisme). Repiqués sur milieu exempt d'azote, ils dégénèrent et meurent.

Les boîtes sont séchées à l'étuve à 60°. Puis nous saupoudrons 0,25 g de glucose à la surface du gel.

L'ensemencement a lieu avec 25 grains de terre de la grosseur d'une tête d'épingle. Une densité plus grande entraîne des contaminations, les colonies s'étalant souvent beaucoup.

Les boîtes de PÉTRI, munies de leur couvercle, sont mises à incuber à 28° dans des conserves contenant de l'eau à leur base.

Après un certain séjour à l'étuve, nous déterminons le pourcentage des grains positifs, c'est-à-dire des grains qui ont donné naissance à une colonie bactérienne.

β) En aérobiose sur milieu liquide (Technique TCHAN proc. Linnéan Soc. NSW 1952, 77).

Des suspensions-dilutions de 10<sup>-1</sup> à 10<sup>-4</sup> sont réalisées à partir d'un certain volume des terres étudiées.

Les cultures ont lieu dans les tubes à essai contenant chacun 10 cm<sup>3</sup> de la solution minérale suivante :

|                                              |                       |
|----------------------------------------------|-----------------------|
| Glucose .....                                | 10 g                  |
| Solution de WINOGRADSKY au 1/20, acide ..... | 1.000 cm <sup>3</sup> |
| CO <sub>3</sub> Ca .....                     | 5 g                   |

Ces tubes sont bouchés au coton puis stérilisés vingt minutes à 120° à l'autoclave.

Cinq tubes par dilution sont ensemencés avec 0,2 cm<sup>3</sup> de cette solution.

Les tubes possédant, après un certain temps d'incubation à l'étuve à 28°, un voile bactérien en surface, sont positifs.

Les résultats sont interprétés statistiquement en utilisant la méthode de MC CRADY. En fonction de la quantité de tubes positifs, des tables donnent, après calcul, le nombre de germes par gramme de terre.

γ) En atmosphère privée d'oxygène, sur milieu solide.

Même technique que pour les « fixateurs en aérobiose ». L'ensemencement a lieu avec 25 grains de terre. L'incubation, comme pour les cellulolytiques, se réalise sous cloche dans laquelle l'oxygène est absorbé en versant de la soude sur du pyrogallol.

## c) Ammonification.

Méthode COPPIER et POCHON (référence : « Pouvoir ammonifiant réel et potentiel du sol dans ses rapports avec la microflore », *Annales de l'Institut Pasteur*, tome 83, p. 200).

Quarante grammes de sable de Fontainebleau sont mis dans une boîte de PÉTRI de 11 cm de diamètre. L'ensemble est stérilisé vingt minutes à 120° à l'autoclave.

Nous ajoutons alors 0,20 g de peptone et mélangeons sable et substance azotée dans un mortier préalablement stérilisé. L'ensemble est remis dans la boîte de PÉTRI avec 12 cm<sup>3</sup> de solution minérale acide de WINOGRADSKY et diluée au 1/20. L'ensemencement a lieu avec 0,5 cm<sup>3</sup> de terre humide.

Après mélange, la boîte sans couvercle est placée dans une grande boîte de PÉTRI (diamètre 19 cm) contenant 20 cm<sup>3</sup> de SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub> N/50 et quelques gouttes de rouge de méthyle.

La grande boîte est fermée avec son couvercle et l'ensemble est mis à incuber à l'étuve à 28°.

Chaque jour dans les débuts de l'expérience, puis tous les deux ou trois jours, l'acide qui n'a pas été neutralisé par l'ammoniaque dégagée par l'activité microbienne est dosé. Il est évident qu'après chaque dosage le SO<sub>4</sub>H<sub>2</sub> et le rouge de méthyle sont renouvelés. Ces opérations se poursuivent sur douze jours environ.

Cette méthode donne l'azote libéré par la microflore ammonifiante, diminué de l'azote réutilisé par les micro-organismes. Le sable n'ayant pas de complexe absorbant ne fixe pas l'ammoniaque.

## d) Nitrification.

α) Vitesse de nitrification.

Dans des fioles d'ERLENMEYER de 100 cm<sup>3</sup>, nous mettons 25 cm<sup>3</sup> de la solution suivante :

|                                                       |                     |
|-------------------------------------------------------|---------------------|
| Solution minérale de WINOGRADSKY .....                | 5 cm <sup>3</sup>   |
| CO <sub>3</sub> Ca .....                              | 1 g                 |
| SO <sub>4</sub> (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> ..... | 0,1 g               |
| Eau distillée .....                                   | 100 cm <sup>3</sup> |

Nous stérilisons et ensemençons avec 1.10 de centimètre cube de terre humide (ce volume est obtenu en pesant l'échantillon, puisque l'on connaît la densité apparente du sol humide).

Nous bouchons avec du coton et mettons à incuber à l'étuve à 28°.

Nous déterminons l'apparition des nitrites ( $\text{NO}_2$ ), après des temps de plus en plus longs de séjour à l'étuve, à l'aide du réactif de GRIESS que nous mettons en présence de 1 cm<sup>3</sup> de la solution contenue dans les fioles d'ERLENMEYER.

L'échelle quantitative est la suivante :

|                            |      |                                  |
|----------------------------|------|----------------------------------|
| Coloration blanche .....   | 0    | (pas de nitrite)                 |
| Coloration rose pâle ..... | +    |                                  |
| Coloration rose net .....  | ++   |                                  |
| Coloration rouge .....     | +++  |                                  |
| Précipitation .....        | ++++ | (quantité importante de nitrite) |

β) Pouvoir nitrificateur.

Méthode J. KAUFFMANN et G. BOQUEL (référence : « Nouvelle méthode de détermination du pouvoir nitrificateur d'une terre », *Annales de l'Institut Pasteur*, tome 81, p. 667).

α') Germes nitreux :

Nous prenons 25 tubes de KAHN par terre. Dans chaque tube est mis 1 cm<sup>3</sup> de la solution suivante :

|                                        |     |                 |
|----------------------------------------|-----|-----------------|
| Solution minérale de WINOGRADSKY ..... | 5   | cm <sup>3</sup> |
| $\text{CO}_2/\text{Ca}$ .....          | 1   | g               |
| Sulfate d'ammonium .....               | 0,1 | g               |
| Eau distillée .....                    | 100 | cm <sup>3</sup> |

Les tubes sont bouchés au coton et stérilisés vingt minutes à 120° à l'autoclave.

Vingt-quatre tubes sont ensemencés avec un grain de terre, l'autre sert de témoin.

Au bout d'un mois de séjour à l'étuve à 28°, nous déterminons les tubes contenant  $\text{NO}_2$  ou  $\text{NO}_3$  par le réactif de GRIESS et la diphenylamine sulfurique.

β') Germes nitriques :

Même technique mais la solution nutritive de base contient 0,1 g de nitrite de sodium en remplacement du sulfate d'ammonium.

Après un mois d'incubation, nous déterminons les tubes ne contenant plus de  $\text{NO}_2$  (négatifs au réactif de GRIESS) et contenant du  $\text{NO}_3$  (positifs à la diphenylamine sulfurique). Un tube dépourvu de  $\text{NO}_2$  et pourvu de  $\text{NO}_3$  est positif.

c) Humification.

La méthode est donnée dans « Contribution à l'étude de la dégradation de l'humus par les micro-organismes du sol », 6<sup>e</sup> Congrès International de la Science du Sol, Paris, vol. C.

## 6) CARACTERES DU COMPLEXE ABSORBANT

a) Somme des bases échangeables.

$\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$  sont dosés par photométrie de flamme en utilisant l'appareil BECHMAN type B (référence : « Méthode d'analyses physiques et chimiques des terres en application au laboratoire de l'Alaotra », *L'Agronomie Tropicale*, janv.-fév., 1958, p. 107).

b) Capacité d'échange totale.

Le détail de la méthode est donné dans le même article que celui concernant la somme des bases échangeables.

## 7) ACIDE PHOSPHORIQUE ASSIMILABLE

α) Méthode TRUOG.

Telle qu'elle est décrite dans « Méthodes d'analyses physiques et chimiques des terres en application au laboratoire de l'Alaotra » *L'Agronomie Tropicale*, janv.-fév., 1958, p. 106.

β) Méthode SAUNDER.

(Référence : « Détermination of available phosphorus in tropical soils by extraction with sodium hydroxide », *Soil Science*, déc. 1956, p. 457.)

## 8) BASES TOTALES ET P.O. TOTAL

Déterminés après attaque nitrique.

(« Méthodes d'analyses physiques et chimiques des terres en application au laboratoire de l'Alaotra », *L'Agronomie Tropicale*, janv.-fév. 1958, p. 112.)

## 9) ACIDITE ET POUVOIR TAMPON

Voir page 293 (n° 3, mars 1968).

Les marques des « PH-mètres » utilisés sont les suivantes : Heito, Jouan, Brewer.

Les mesures sont faites après une demi-heure de contact entre le sol et l'eau.

## 10) NATURE MINERALOGIQUE DES ARGILES

Les méthodes sont celles utilisées au SSC de Bondy (ORSTOM).

### a) Extraction de la fraction argileuse.

Elle s'effectue sur un sol émietté au rouleau et passé au tamis de 2 mm.

#### α) Destruction de la matière organique.

Mettre l'échantillon dans un bêcher de 600 cm<sup>3</sup>.

Ajouter 100 cm<sup>3</sup> d'eau oxygénée à 40 volumes, agir avec précaution dans le cas de terres très organiques : la mousse formée est très abondante et pourrait s'échapper du bêcher. Pour éviter cet inconvénient, arroser la mousse avec de l'alcool à l'aide d'un vaporisateur.

Porter sur plaque chauffante et éviter une ébullition trop forte qui décomposerait l'eau oxygénée trop rapidement.

La réaction est terminée quand la mousse a disparu et que l'on n'aperçoit plus que le dégagement de petites bulles d'oxygène.

Il est parfois nécessaire de faire de nouvelles additions d'eau oxygénée et ce traitement peut demander plusieurs heures.

Eliminer l'excès d'eau oxygénée en faisant bouillir et, au besoin, en ajoutant quelques gouttes d'ammoniaque.

Retirer de la plaque chauffante et laisser refroidir.

#### β) Désaturation du complexe.

Les terres étudiées ne sont pas calcaires.

Ajouter 200 cm<sup>3</sup> d'acide chlorhydrique N/10 pour libérer les ions Ca<sup>++</sup>. Agiter à plusieurs reprises.

Laisser flocculer l'argile pendant plusieurs heures.

Décanner le liquide surnageant sur filtre.

Répéter l'opération s'il y a lieu.

Agiter et faire passer la terre sur filtre en une seule fois, ceci afin de mélanger les particules fines et grossières, ce qui évite le colmatage du filtre.

Prélever quelques gouttes du filtrat dans un tube à essai, neutraliser par l'ammoniaque, ajouter de l'oxalate d'ammonium, chauffer : il ne doit pas y avoir de précipité. (L'oxalate d'ammonium se transformant en oxalate de calcium donne un précipité.)

Laver alors à l'eau distillée chaude, jusqu'à disparition des ions Cl<sup>-</sup> (réaction au nitrate d'argent :  $\text{NO}_3\text{Ag} + \text{Cl} \rightarrow \text{trouble}$ ). La fin du lavage se remarque en général à ce que la filtration devient très lente et que la terre commence à se disperser.

#### γ) Dispersion.

Le lavage terminé, placer l'entonnoir au-dessus d'une allonge à sédimentation ; percer le filtre et entraîner la terre par un jet d'eau distillée chaude.

Compléter le volume avec de l'eau distillée de façon à avoir une hauteur de 20 cm, au moins, au-dessus du dépôt terreux (volume voisin de 1.000 cm<sup>3</sup>).

Ajouter 25 cm<sup>3</sup> d'ammoniaque 22° B.

Agiter à l'agitateur mécanique pendant deux heures.

#### δ) Prélèvement.

Agiter énergiquement par retournement en s'assurant que tout le dépôt qui a pu se faire au fond de l'allonge est entièrement remis en suspension.

Prélever à 20 cm une argile de 2 μ. (Voir analyse granulométrique.)

Recueillir ce que l'on prélève dans un bêcher de 2 litres.

Répéter la mise en suspension, la sédimentation et la décantation, après avoir ajouté la quantité nécessaire d'eau distillée pour avoir une hauteur de 20 cm. Ajouter 2 cm<sup>3</sup> d'ammoniaque.

Continuer ces opérations jusqu'à ce que, à la fin de la sédimentation, le liquide soit devenu clair sur les 20 cm.

Après chaque décantation, mettre à évaporer. Recevoir les nouvelles fractions de la suspension dans le même bêcher.

Après le dernier prélèvement, évaporer à sec sur bain-marie. Sécher à l'étuve à 105° jusqu'à poids constant en broyant au mortier d'agate entre deux passages à l'étuve.

Mettre l'argile dans un tube bouché.



## b) Traitements pouvant être réalisés sur la fraction argileuse.

Les échantillons normaux sont des argiles à 2  $\mu$  saturées par  $\text{NH}_4$ , broyées et séchées. Il est préférable parfois d'opérer sur des argiles à 1  $\mu$ .

### $\alpha$ ) Déferrification.

Mettre dans un bêcher de 150  $\text{cm}^3$  : 2 g d'argile (broyée puis séchée à 105°) et 50  $\text{cm}^3$  d'une solution composée de tartrate de sodium N et d'acétate de sodium N/2. Pour obtenir cette solution, opérer ainsi : 115 g de tartrate ( $\text{Na}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et 16,4 g d'acétate ( $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{Na}$ ) sont solubilisés dans un litre d'eau.

Porter l'ensemble à 40° (ne pas faire bouillir) et ajouter 2 g d'hydrosulfite de sodium. Laisser réagir une heure ou plus (l'argile de rouge passe au gris clair, au noir ou au vert). En principe, la coloration rouge doit disparaître. Si elle persiste, on peut retraiter l'argile une deuxième fois (cas rare).

Remplir le bêcher avec  $\text{CH}_4$  N/20, agiter, laisser décanter. (Au bout d'une demi-heure, l'argile est en principe décantée. Si elle disperse, centrifuger.)

Laver à l'eau jusqu'à disparition de  $\text{Cl}^-$  (réaction avec  $\text{NO}_3\text{Ag}$ ).

Sécher à l'étuve à 105°. Broyer au mortier. Sécher à l'étuve à 105°. Mettre au dessiccateur.

### $\beta$ ) Nouvelle destruction de la matière organique.

Elle est souvent nécessaire pour les sols très hydromorphes. Elle se réalise à l'aide d'eau oxygénée.

### $\gamma$ ) Saturation de l'argile par différents cations (Ca, Mg, $\text{NH}_4$ , etc.).

Prendre un chlorure d'un cation à la concentration N environ.

Faire bouillir une heure l'argile et le chlorure.

Laver à l'eau distillée.

Sécher. Broyer. Sécher.

### $\delta$ ) Chauffage.

Chauffer une heure et demie à 350° une argile magnésienne.

La montmorillonite passe de 14 ou 15 angström à 10 ou 11 angström.

La vermiculite reste à 14 ou 15 angström.

## c) Analyse aux rayons X.

### $\alpha$ ) Matériel utilisé.

$\alpha'$ ) Diffractomètre de la Compagnie Générale de Radiologie, type 10 (siège à Paris).

Caractéristiques :

Pompe à vide pour le tube à rayons X.

Tube à rayons X composé d'une cathode en tungstène et d'une anticathode variable. L'anticathode est tournante et permet de passer ainsi sur différents métaux. Dans les analyses réalisées pour ce travail, l'anticathode au cobalt a été utilisée. (Le cobalt est préféré au cuivre, car ces argiles riches en fer donnent avec le cuivre un fond gênant et des raies moins bien dessinées. Le cuivre reste pourtant plus intense que le cobalt.)

Prisme monochromateur sélectionnant la radiation  $\text{K } 1 = 1,7853$  Angström obtenue par l'anticathode au cobalt.

### $\beta'$ ) Collimateur à fentes.

Premier réglage :

Il s'effectue sur le faisceau, avant son arrivée sur l'échantillon à étudier. (Limites des fentes : 0 et 5.)

Deuxième réglage :

Il s'effectue sur le faisceau diffracté. (Limites des fentes : 0 et 5.)

Troisième réglage :

Il est réalisé sur l'arrivée au compteur proportionnel GEIGER. (Limites des fentes : 1 à 2.)

Sur les graphiques, nous portons par exemple :  $2 \times 3 \times 2$ .

Cela signifie :

|                               |   |                                                                 |
|-------------------------------|---|-----------------------------------------------------------------|
| Premier réglage fente .....   | 2 | } plus ces chiffres sont forts,<br>plus les fentes sont larges. |
| Deuxième réglage fente .....  | 3 |                                                                 |
| Troisième réglage fente ..... | 2 |                                                                 |

### $\gamma'$ ) Echantillon.

Dans une lamelle de verre évidée, aux mesures suivantes : 25 mm  $\times$  15 mm  $\times$  0,5 mm et dépolie, nous plaçons de l'argile broyée et séchée.

Cette poudre n'est pas recouverte d'une autre lamelle. Le diagramme est appelé « diagramme de poudre ». C'est celui de BAYE-SCHERRER, à la différence que la mise en place de l'échantillon dans la lamelle oriente déjà un peu les feuillet d'argile. (Si l'orientation est trop marquée, il s'ensuit une suppression de certaines raies et l'analyse quantitative se trouve faussée.)

#### δ') Goniomètre.

Il a pour but d'orienter l'échantillon par rapport au faisceau de rayons X. L'ensemble compteur GEIGER et échantillon tourne en restant solidaire. Pendant cette rotation, il y a diffraction quand l'échantillon se trouve sous un angle qui satisfait la relation de BRAGG.

$$\lambda = 2 d \sin \theta$$

où :  
 $\lambda$  = longueur d'onde du rayonnement X (fonction de la nature de l'anticathode);  
 $d$  = distance inter-réticulaire des plans intéressés;  
 $\theta$  = angle.

C'est le rayonnement diffracté qui est enregistré par le compteur GEIGER.

Le goniomètre possède un système de pointage se traduisant sur le graphique d'enregistrement par des traits séparés par une distance représentant 1/10 de degré.

Le moteur du goniomètre tourne à six vitesses. Il en résulte un étalement plus ou moins grand des spectres sur le graphique. (Dans les analyses réalisées, seules les deux vitesses suivantes ont été utilisées : 5 minutes par degré et 3 minutes par degré.)

ε') Enregistreur électrique : MECI Speedomax, avec système d'amplification permettant de régler l'intensité de la raie.

#### Sensibilité :

Elle se règle par :

la sensibilité impulsion variant de 1 à 320;

la sensibilité de l'enregistreur (amplitude de déplacement de la plume qui a deux positions.

Pour la position 2, on a une raie deux fois plus grande que celle obtenue pour la position 1.

Sur les graphiques, l'indication  $S = 20/2$  annonce que la sensibilité impulsion seconde est réglée sur 20 et que la sensibilité de l'enregistreur est réglée sur 2.

#### Inertie :

Nous la réglons en fonction de la sensibilité. Pour une forte sensibilité, l'inertie sera forte.

$$0,5 \leq \text{Inertie} \leq 20$$

#### β) Interprétation des spectres.

Passer des degrés enregistrés sur le graphique aux écarts réticulaires en angström à l'aide d'un tableau de correspondance établi à partir de la formule de BRAGG.

Pour caractériser un minéral en fonction de ses écarts réticulaires, se référer à :

#### Spectres de référence.

X-Ray Identification and Crystal structures of Clay Minerals. Edited by G.W. BRINDLEY, London, 1951. Printed in Great Britain by Taylor and Francis L.T.D. Red Lion Court, Fleet St London, E.C. 4.

Alphabetical and grouped numerical index of X-Ray diffraction data (1953). American Society for testing materials, 1916, Race Street, Philadelphia.

#### REMARQUE :

Sur les graphiques nous portons :

$I = 20$  (inertie).

$S = 20/2$  (sensibilité).

$0,75 \times 1,75 \times 2$  (fentes).

Anticathode Co.

7° 18 (Raie de la kaolinite. On passe un échantillon de kaolinite pour vérifier le bon fonctionnement des appareils. Si l'anticathode est sale, la raie diminue d'intensité).

#### d) Analyse thermique différentielle.

Matériel utilisé :

α') Chauffage au four.

Moteur électrique Vassal monophasé 50 Hz servant à faire varier le voltage de l'appareil suivant : Rhéotor ADB, autotransformateur à curseur.

β') Enregistreur.

Galvanomètre SEFRAM, 74, rue de la Fédération, Paris (15°).

Enregistreur MECI, 123, boulevard de Grenelle, Paris (15°).

e) **Thermobalance.** $\alpha$ ) Matériel utilisé :

Enregistreur ADAMEL, 4-6, passage Louis-Philippe, Paris (11<sup>e</sup>).

Ce four est à réglage automatique par système Chevenard-Journier. Type CTTHSP.

La température du four est donnée par un galvanomètre SEFRAM. Type LTV.

Le réglage de la chauffe du four est automatique.

 $\beta$ ) Enregistrement.

L'appareil enregistre une courbe qui a pour abscisse les pertes de poids du minéral et pour ordonnée les temps de chauffage.

Toutes les dix à vingt minutes, au cours de l'enregistrement, nous réalisons sur la courbe un pointé. Au moment de ce pointé, nous relevons la déviation du galvanomètre.

Cette déviation permet, au moyen d'une table établie à l'aide de points de fusion, de connaître la température du four en degrés.

Sur la courbe d'enregistrement (voir fig. 75), nous mesurons les distances de la courbe à l'axe des ordonnées au niveau de chaque pointé (A X 1, B X 2, etc.).

Cette distance est fonction, d'une part, de la sensibilité de la balance, et, d'autre part, du poids de l'échantillon mis dans la thermobalance.

La sensibilité de la thermobalance est donnée en mettant un poids de 50 mg sur son plateau et en notant le déplacement de l'aiguille.

Exemple : déplacement de l'aiguille = 59 mm. Ainsi, 1 mm de déplacement correspond à  $50/59 = 0,847$  mg. Si l'échantillon mis dans la thermobalance est de 400 g, pour ce poids nous avons un déplacement h, donc pour 1.000 mg, nous aurons :  $h \times 1.000/400$ .

En conclusion, il suffira pour transformer les distances A X 1, B X 2, etc., en perte de poids (‰), de multiplier les distances A X 1, B X 2 exprimées en millimètres par le coefficient  $0,847 \times 1.000/400 = 2,117$ .

Ce calcul permet de tracer les courbes de pertes de poids (‰) des échantillons, en fonction de leurs températures.

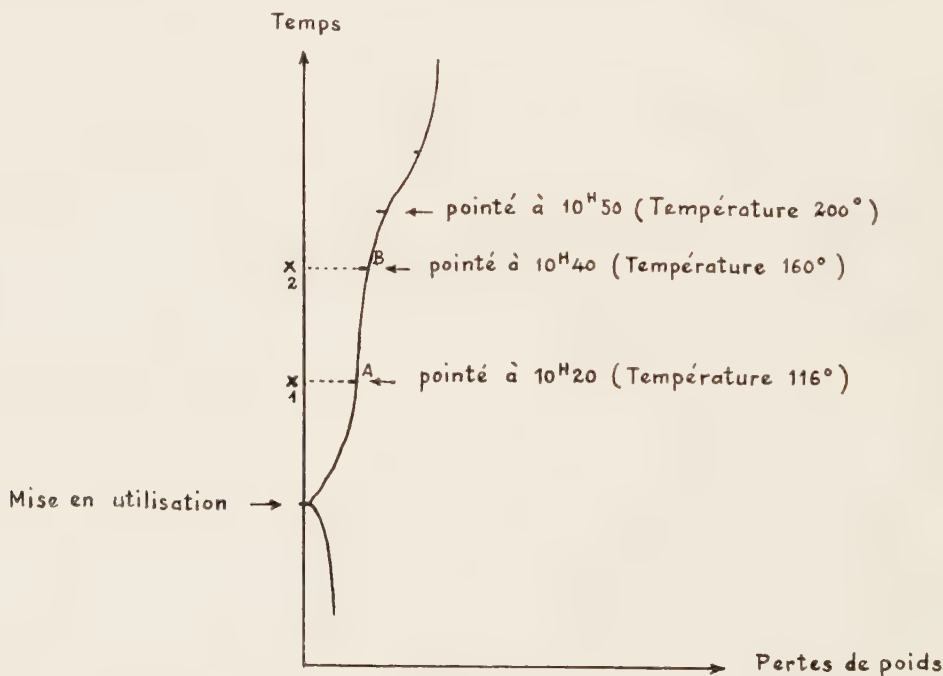


Fig. 75

11) **FER**a) **Fer libre.**

Méthode DEB modifiée.

Telle qu'elle est décrite dans : « Précis de Pédologie », par Ph. DUCHAUFOR, Masson et C<sup>ie</sup>, 1960, p. 389.

Méthode BARBIER.

Le fer libre est extrait par agitation avec l'acide oxalique. L'intensité de la coloration donnée en présence de sulfocyanure d'ammonium est ensuite mesurée. Nous utilisons peu cette méthode qui a été menée parallèlement à celle de DEB.



b) **Fer total.**

Méthode HARDY et BAEYENS.

Utilisant une attaque triacide (référence : « Méthodes d'analyses physiques et chimiques des terres en application au laboratoire de l'Alaotra », *L'Agronomie Tropicale*, janv.-fév. 1958, p. 109-11).

c) **Fer ferreux.**

Test qualitatif pour sols acides.

Mettre 2 à 3 g de sol dans un tube à essai avec 5 à 10 cm<sup>3</sup> de réactif de COMBER (4 % de sulfo-cyanure de K dans l'alcool à 95°), ou mieux, de réactif d'EMERSON (1 g de CNSK, 95 cm<sup>3</sup> d'acétone et 5 cm<sup>3</sup> d'éther).

Par échange, le sel de potassium fait passer les sels ferriques en solution qui colorent en rouge le sulfocyanure.

En présence de sels ferreux seuls, ce qui est le cas pour un horizon de gley, il n'y a pas de coloration. En ajoutant une ou deux gouttes d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, la couleur rouge apparaît.

Si l'horizon renferme à la fois des sels ferreux et ferriques, on a renforcement de la couleur par addition d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

12) **ALUMINE**a) **Alumine échangeable.**

Méthode JACKSON.

Modifiée par le laboratoire de l'Ecole Nationale des Eaux et Forêts de Nancy (référence : « Précis de Pédologie », par Ph. DUCHAUFOR, Masson et C<sup>ie</sup>, 1960, p. 390).

b) **Alumine totale.**

Méthode HARDY et BAEYENS.

Même référence que pour le fer total.

13) **CARACTERES PHYSIQUES CONCERNANT LA REALISATION SOL-EAU**a) **pF** : voir page ?b) **Perméabilité.**

Méthode HENIN.

Référence : « Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols », par HENIN, MONNIER et COMBEAU, *Ann. Agro. INRA*, 1958, janv.-fév., n° 1, p. 71-90.

c) **Plasticité.**

Méthode des bâtonnets.

Plusieurs échantillons d'une même terre sont amenés à des humidités différentes. Ils sont roulés entre des lames de verre jusqu'à ce que les bâtonnets formés se cassent. Les diamètres des bâtonnets sont alors déterminés, ainsi que leur humidité.

**RESUME.** — *L'étude de nombreuses dépressions engorgées par l'eau est entreprise dans l'ensemble de la République Malgache et plus particulièrement dans la zone des plateaux occupant la partie centrale de l'île.*

*Elle montre que des analogies d'ordre pédologique existent d'une dépression à l'autre, qui sont suffisamment mises en évidence en se référant à cinq profils typiques, répartis le long de la pente qui s'incline vers le centre de la dépression occupée par le marais.*

*Les divers profils pris en considération correspondent, pour ceux qui sont topographiquement les plus élevés, à des dépôts alluviaux soumis à une hydromorphie partielle et temporaire et, pour ceux qui sont les plus bas, à des dépôts alluviaux recouverts de débris organiques dérivés des Cypéracées qui constituent la végétation des marais. Les profils de bas de pente sont soumis à une hydromorphie totale, quasi permanente.*

*L'abandon de la méthode classique d'expression des résultats analytiques par rapport à un poids de terre sèche et son remplacement par une expression des résultats donnée en fonction d'un volume de sol placé dans des conditions d'humidité favorable à la culture montrent que, dans la chaîne de sols étudiée, c'est pour le profil qui présente un engorgement par l'eau ni trop marqué ni trop faible, que les meilleurs caractères analytiques sont réunis, laissant ainsi présumer d'une aptitude culturale particulièrement bonne.*

*La grande extension géographique des terres tourbeuses, placées en bas de pente, qui ne sont pas cultivées, puisque trop noyées, conduit ceux qui désirent étendre la surface rizicole et possèdent de puissants moyens mécaniques pour contrôler à la fois le drainage et l'irrigation à s'intéresser tout particulièrement à elles.*

*L'étude se poursuit donc par la connaissance plus détaillée des « sols tourbeux » et par l'examen des modifications d'ordre physique, chimique, biologique et minéralogique consécutives à leur drainage.*

*L'ensemble des résultats obtenus montre que c'est pour un stade évolutif moyen, correspondant à des conditions d'hydromorphie ni excessive ni trop réduite, que les sols tourbeux soumis au drainage présentent une somme de caractères analytiques la plus favorable à une bonne production végétale.*

*Il y a ainsi une analogie avec les résultats fournis par la chaîne de sols.*

*Une expérimentation menée avec le riz, en vases de végétation et en cases lysimétriques, confirme les pronostics formulés aux vues des résultats analytiques.*

*Les différences de rendements, obtenus en fonction de l'état d'évolution d'une tourbe drainée, sont très marquées puisque les récoltes varient dans les cas extrêmes de 1 à 10 t de paddy par hectare.*

*Les enseignements donnés par la connaissance de l'évolution d'une tourbe conduisent à formuler des conseils sur les méthodes à adopter pour permettre de tirer, pendant le temps le plus long, le meilleur profit agricole d'une tourbe.*

#### **SUMMARY.—DYNAMICS OF THE MALAGASY HYDROMORPHIC ORGANIC SOILS IN RELATION TO RICE CULTURE.**

*The study of many waterlogged depressions was initiated in the whole Malagasy Republic, in particular in the plateau area which occupies the central part of the island.*

*It shows that there are pedological analogies from one depression to another and that these analogies are sufficiently revealed by referring to five typical profiles, distributed along the slope slanting towards the center of the depression which a marsh covers.*

*The various profiles studied correspond to alluvial deposits. The upper profiles, from a topographical point of view, are partially and temporarily hydromorphic. The profiles at the bottom of the slope are alluvial deposits, covered with organic debris derived from the Cyperaceae which make up the vegetation of the marshes. Moreover, these profiles at the bottom of the slope are thoroughly and almost permanently hydromorphic.*

*The current method which expresses analytical results in terms of weight of dry earth was replaced by the method expressing the results in terms of a volume of soil under moisture conditions suitable for cultivation. This method shows that in the catena studied the greater part of the best analytical characters are gathered in the profile in which waterlogging is neither too high nor too low, which suggests that it should be particularly suitable for cultivation.*

*It is necessary to express results in terms of unit volume, because the bulk density of the various soils studied vary to a very great extent. As the root system of a plant occupies a somewhat definite volume of soil, even in taking into account the ability of the plant to develop its roots more particularly under certain environment conditions, the amount of nutrient in soils of varying density must be estimated by unit volume of soil.*

*Because the peaty soils at the bottom of the slope, which are not cultivated for being too waterlogged, cover large areas, people who want to increase the rice-field acreage and have at their disposal important mechanical means to control both drainage and irrigation are led to be particularly interested in them.*

*The study then gives us more detailed information on "peaty soils" and examines the physical, chemical, biological and mineralogical changes due to drainage.*

*The results as a whole indicate that it is in the case of a mean stage of evolution, evolution due to drainage, which corresponds to a soil neither too highly nor slightly hydromorphic, that the peaty soil subject to drainage presents the sum of analytical characters the most suitable for good plant production.*

*The results correspond to those obtained from the catena.*

*An experiment carried out on rice, in pots and lysimeters, confirms the forecasts framed from the analytical results.*

*Yields are markedly different according to the stage of evolution of a drained peat as harvests vary from 1 to 10 t of paddy per hectare in the extreme cases.*

*The knowledge of the evolution of a peat under the effect of drainage results in important information which lead to give advice on the methods to be adopted with peat to obtain the highest yields for a period as long as possible.*

# **RESUMEN. — DINAMICA DE LOS SUELOS HIDROMORFICOS ORGANICOS DE MADAGASCAR EN RELACION CON EL CULTIVO DEL ARROZ.**

*Se ha llevado a cabo el estudio de numerosas depresiones saturadas por el agua, que existen en todo el territorio de Madagascar, refiriéndose más especialmente a la zona de mesetas situadas en la parte central de la isla.*

*Dicho estudio demuestra la existencia de analogías, desde el punto de vista pedológico, entre las distintas depresiones; dichas analogías resultan evidentes al referirse a cinco perfiles típicos distribuidos a lo largo de la pendiente que se inclina hacia el centro de la depresión ocupada por el pantano.*

*En cuanto a los perfiles que se toman en consideración, cabe resaltar los siguientes puntos: los perfiles superiores corresponden a depósitos aluviales sometidos a un hidromorfismo parcial y temporal; en los perfiles inferiores, se trata de depósitos aluviales cubiertos de residuos orgánicos derivados de las Cyperaceae que constituyen la vegetación de los pantanos. Los perfiles situados al pie de la pendiente están sometidos a un hidromorfismo total y casi permanente.*

*En lugar del método clásico, en que se expresan los resultados analíticos en relación con un peso de tierra seca, se ha empleado un método que consiste en expresar los resultados teniendo en cuenta un volumen de suelo colocado en condiciones de humedad favorables al cultivo. Con este método se ha observado que, en la cadena de suelos estudiados, el perfil caracterizado por una saturación no excesiva ni escasa presentaba los mejores caracteres analíticos, lo cual permitía suponer que su aptitud para el cultivo era buenísima.*

*Es indispensable adoptar la expresión de los resultados por unidad de volumen, ya que las densidades aparentes de los distintos suelos objeto del estudio varían en proporciones notables. En efecto, el sistema radicular de una especie vegetal ocupa un volumen de suelo bastante bien definido, incluso cuando se tiene en cuenta el hecho de que la planta puede desarrollar sus raíces en algunas condiciones ambientales, por lo cual sólo se puede evaluar la cantidad de un elemento nutritivo puesto a disposición de la planta refiriéndose a una unidad de volumen de suelo.*

*Cabe señalar que las grandes áreas geográficas de tierras turbosas situadas al pie de la pendiente no se dedican al cultivo, por causa de la sumersión excesiva. Por consiguiente, en cualquier proyecto para aumentar las superficies dedicadas al cultivo del arroz será preciso tomar en consideración la existencia de dichas tierras turbosas, siempre que sea posible disponer de poderosos medios mecánicos para controlar a la vez el drenaje y el riego.*

*Se prosigue el estudio con un análisis más pormenorizado de los « suelos turbosos » y un examen de las modificaciones causadas por el drenaje en el aspecto físico, químico, biológico y meneralógico.*

*El conjunto de resultados obtenidos demuestra que los suelos turbosos sometidos al drenaje presentan la suma de caracteres analíticos más favorable a una buena producción vegetal en el caso del estadio evolutivo intermedio, es decir cuando las condiciones de hidromorfismo no son excesivas ni demasiado reducidas.*

*Se nota por tanto una analogía con los datos relativos a la cadena de suelos.*

*La experimentación llevada a cabo sobre el arroz, en macetas y en lisímetros, confirman los pronósticos formulados según los resultados analíticos.*

*Las diferencias de rendimientos obtenidos en función del estado de evolución de una turba drenada resultan marcadísimas ya que las cosechas varían en los casos extremos de 1 a 10 t de arroz-paddy.*

*La enseñanza derivada del conocimiento de la evolución de un suelo turboso permite formular recomendaciones acerca de los métodos que se tienen que adoptar para sacar el mejor provecho agrícola de dicho suelo, durante el mayor tiempo posible.*



## TABLE DES MATIERES

|                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>INTRODUCTION</b> .....                                                                                                                                         | 5   |
| I) Généralités .....                                                                                                                                              | 5   |
| II) Buts poursuivis .....                                                                                                                                         | 7   |
| III) Grandes subdivisions adoptées dans le texte .....                                                                                                            | 7   |
| IV) Constitution du matériau originel des sols hydromorphes .....                                                                                                 | 7   |
| 1) Mécanisme des accumulations en bas-fonds .....                                                                                                                 | 8   |
| 2) Provenance des matériaux minéraux .....                                                                                                                        | 8   |
| 3) Provenance des matériaux organiques .....                                                                                                                      | 20  |
| V) Plan d'ensemble adopté .....                                                                                                                                   | 23  |
| <b>CHAPITRE I. DEFINITION D'UNE CHAÎNE DE SOLS, TYPIQUE DES DEPRESSIONS, DANS LESQUELLES L'ENGORGEMENT PAR L'EAU EST STABLE DEPUIS DE NOMBREUSES ANNEES</b> ..... | 26  |
| I) Morphologie des principaux profils constituant cette chaîne .....                                                                                              | 26  |
| II) Caractères analytiques des divers profils de la chaîne .....                                                                                                  | 32  |
| A) Définition sommaire des techniques analytiques .....                                                                                                           | 33  |
| B) Résultats analytiques obtenus .....                                                                                                                            | 34  |
| 1) Granulométrie .....                                                                                                                                            | 34  |
| 2) Eléments organiques .....                                                                                                                                      | 34  |
| 3) Complexe absorbant .....                                                                                                                                       | 42  |
| 4) Acidité et pouvoir tampon .....                                                                                                                                | 46  |
| 5) Etude minéralogique de la fraction argileuse .....                                                                                                             | 46  |
| 6) Etat du fer .....                                                                                                                                              | 53  |
| 7) Rapport silice/alumine .....                                                                                                                                   | 58  |
| III) Conclusions relatives au premier chapitre et classification pédologique des sols étudiés. ....                                                               | 58  |
| <b>CHAPITRE II. CONSEQUENCES D'ORDRE PEDOLOGIQUE RELATIVES AU DRAINAGE DES DEPRESSIONS, EN PRENANT POUR EXEMPLE LE SOL LE PLUS HYDROMORPHE DE LA CHAÎNE</b> ..... | 62  |
| <b>EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE PAR ACTION COMBINEE DU DRAINAGE ET DU FEU.</b> .....                                                                               | 62  |
| I) Morphologie des principaux stades évolutifs du profil tourbeux .....                                                                                           | 63  |
| A) Description des profils .....                                                                                                                                  | 63  |
| B) Notion de tassement et conséquences sur la mise en valeur des terres .....                                                                                     | 69  |
| C) Résumé des conséquences du drainage sur la morphologie des tourbes .....                                                                                       | 70  |
| II) Caractères analytiques des principaux stades évolutifs du profil tourbeux .....                                                                               | 70  |
| A) Définition sommaire des techniques analytiques .....                                                                                                           | 70  |
| B) Résultats analytiques obtenus .....                                                                                                                            | 73  |
| 1) Granulométrie .....                                                                                                                                            | 73  |
| 2) Eléments organiques .....                                                                                                                                      | 73  |
| 3) Caractères biologiques .....                                                                                                                                   | 83  |
| 4) Caractères du complexe absorbant .....                                                                                                                         | 94  |
| 5) Acide phosphorique assimilable .....                                                                                                                           | 96  |
| 6) Bases totales .....                                                                                                                                            | 97  |
| 7) Acide phosphorique total .....                                                                                                                                 | 97  |
| 8) Acidité et pouvoir tampon .....                                                                                                                                | 102 |
| 9) Nature minéralogique des argiles .....                                                                                                                         | 102 |
| 10) Fer .....                                                                                                                                                     | 102 |
| 11) Rapport silice/alumine .....                                                                                                                                  | 106 |
| 12) Caractères physiques concernant la relation sol-eau .....                                                                                                     | 106 |
| III) Conclusions sur l'évolution à longue échéance par action combinée du drainage et du feu .....                                                                | 118 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| EVOLUTION A BREVE ECHEANCE PAR ACTION IMMEDIATE DU BRULAGE .....                                                                                       | 121 |
| I) Intensité des incendies .....                                                                                                                       | 122 |
| II) Conséquences du feu sur la morphologie des profils .....                                                                                           | 126 |
| III) Action du feu sur les caractères analytiques des profils .....                                                                                    | 131 |
| A) Granulométrie .....                                                                                                                                 | 131 |
| B) Eléments organiques .....                                                                                                                           | 131 |
| C) Caractères biologiques .....                                                                                                                        | 132 |
| D) Complexe absorbant .....                                                                                                                            | 133 |
| E) Bases totales et acide phosphorique total .....                                                                                                     | 134 |
| F) Acidité et pouvoir tampon .....                                                                                                                     | 135 |
| G) Caractères physiques concernant les relations sol-eau .....                                                                                         | 137 |
| IV) Répercussions du brûlage sur les érosions .....                                                                                                    | 140 |
| V) Conclusion sur l'évolution à brève échéance .....                                                                                                   | 144 |
| CONCLUSION D'ENSEMBLE SUR L'EVOLUTION A LONGUE ECHEANCE ET A BREVE ECHEANCE, PUIS CLASSIFICATION PEDOLOGIQUE DES DIVERS STADES EVOLUTIFS ETUDIES ..... | 144 |
| 1) Conclusion .....                                                                                                                                    | 144 |
| 2) Classification pédologique .....                                                                                                                    | 145 |
| CHAPITRE III. INFLUENCE DE L'EVOLUTION PROVOQUEE PAR DRAINAGE DU SOL LE PLUS HYDROMORPHE DE LA CHAINE SUR SON APTITUDE A NOURRIR LES VEGETAUX .....    | 147 |
| I) Alimentation en eau du végétal .....                                                                                                                | 148 |
| A) Résistance à la sécheresse liée à la nature du sol .....                                                                                            | 148 |
| B) Influence sur les rendements de la hauteur de la nappe recouvrant un sol .....                                                                      | 151 |
| II) Alimentation minérale .....                                                                                                                        | 152 |
| A) Essais en vases de végétation .....                                                                                                                 | 152 |
| B) Essais en cases lysimétriques .....                                                                                                                 | 157 |
| III) Conclusions relatives à l'ensemble de l'expérimentation réalisée .....                                                                            | 167 |
| CONCLUSIONS GENERALES .....                                                                                                                            | 170 |
| Observations et conclusions essentielles .....                                                                                                         | 170 |
| Intérêt de la connaissance des sols hydromorphes organiques malgaches .....                                                                            | 173 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                                                                                                                    | 175 |
| ANNEXE .....                                                                                                                                           | 183 |
| RESUMES .....                                                                                                                                          | 191 |

001  
002  
003  
004  
005  
006  
007





